

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



MINIMIZACIÓN DE COSTOS DE TRANSPORTE
EUROPA-MONTERREY

POR

DANIELA ROMÁN ECHEVARRÍA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

OCTUBRE, 2018

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**MINIMIZACIÓN DE COSTOS DE TRANSPORTE
EUROPA-MONTERREY**

POR

DANIELA ROMÁN ECHEVARRÍA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

OCTUBRE, 2018

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Minimización de costos de transporte Europa-Monterrey», realizada por el alumno Daniela Román Echevarría, con número de matrícula 1883876, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis



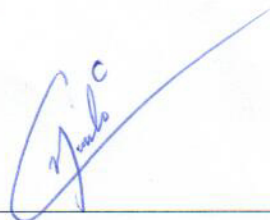
Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

Asesor



Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

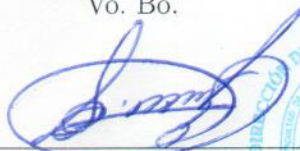
Revisor



MLyCS Claudia Maribel Morales Carreón

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, octubre 2018

Para mis guerreros incansables...
Esto es para ustedes, mamá y papá.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XI
Resumen	XII
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Objetivo	6
1.3. Hipótesis	6
1.4. Justificación	6
1.5. Metodología de la investigación	8
1.6. Estructura de la tesis	8
2. Antecedentes	10
2.1. De los modelos clásicos a los modernos	11
2.1.1. Modelos clásicos de ubicación	11
2.1.2. Relevancia de las teorías clásicas de la ubicación	22
2.2. Problema de la localización de instalaciones	22

2.2.1. Métodos cualitativos	25
2.2.2. Métodos cuantitativos	28
2.3. Programación lineal entera mixta como herramienta de solución propuesta	49
3. Metodología	52
3.1. Candidatos a replicar el modelo propuesto	55
3.2. Estructura básica de los modelos de programación lineal	56
3.2.1. Función objetivo del problema de localización de instalaciones en MIP	58
3.3. Modelo de caso de estudio «Minimización de costos de transporte Europa-Monterrey»	58
3.3.1. Notación del modelo	59
3.3.2. Análisis de complejidad	65
3.4. Resultados operativos esperados	67
4. Experimentación	69
4.1. Lógica del modelo	70
4.2. Primer escenario	74
4.2.1. Ciclo 1	74
4.2.2. Ciclo 2	78
4.2.3. Costos totales	82
4.3. Segundo escenario	83

4.4. Tercer escenario	88
5. Análisis y resultados	94
5.1. Comparación de los resultados	94
5.2. Recomendación final	98
6. Conclusiones	100
6.1. Aportaciones a la cadena de suministro	100
6.2. Contribución científica	102
6.3. Trabajo a futuro	102

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Gráfica comparativa por proveedor.	4
2.1. Círculos concéntricos del estado aislado.	15
2.2. Triángulo de ubicación de Weber.	19
2.3. Curva de la demanda de Christaller.	21
2.4. Ejemplo de localización de instalaciones para centros de consolidación.	25
2.5. Proceso de modelado.	29
2.6. Representación de un problema multietapas y multiproductos.	40
2.7. Métodos de solución del problema de localización de instalaciones.	49
3.1. Etapas de la IO	55
4.1. Patrón de envío con 6 períodos. Primer ciclo.	75
4.2. Patrón de envío con 6 períodos. Segundo ciclo.	80
4.3. Patrón de envío con 12 períodos. Parte 1.	84
4.4. Patrón de envío con 12 períodos. Parte 2.	85
4.5. Distribución en porcentaje de los períodos de permanencia de los envíos.	93

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Distribución de proveedores por país.	3
1.2. Matriz comparativa por proveedor.	4
1.3. Costos comparativos en embarques LCL y FCL.	7
2.1. Matriz comparativa de las teorías clásicas.	23
2.2. Herramientas de solución del problema de localización de instalaciones.	51
3.1. Análisis de complejidad.	66
4.1. Resultados de las variables de decisión.	73
4.2. <i>Pallets</i> expeditados en el período 1. Primer ciclo.	76
4.3. Total de <i>pallets</i> consolidados en contenedores FCL para 6 períodos. Primer ciclo.	77
4.4. <i>Pallets</i> expeditados en el período 1. Segundo ciclo.	79
4.5. Total de <i>pallets</i> consolidados en contenedores FCL para 6 períodos. Segundo ciclo.	81
4.6. Integración del escenario 6+6.	83
4.7. <i>Pallets</i> expeditados en el período 1.	86

4.8. Total de <i>pallets</i> consolidados en embarques FCL para 12 períodos. . .	87
4.9. <i>Pallets</i> expeditados en los períodos 1 al 4.	88
4.10. Activación de instalaciones por período.	89
4.11. Total de <i>pallets</i> consolidados en embarques FCL para 52 períodos. . .	90
4.12. Total de <i>pallets</i> a inventariar en 52 períodos.	92
5.1. Síntesis de resultados de los escenarios.	95

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis papás, que son mi inspiración diaria y siempre me impulsan hacia la excelencia.

A mis hermanos Gaby y Rober, que me motivan con su gran ejemplo.

A mis sobrinas Nats, Emilia e Isabela, que me hacen recordar que debo mantener la capacidad de asombro.

A mi tutora, la Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez, que con gran paciencia y actitud de servicio, confió en mí y me apoyó en todo momento.

A mi comité académico: Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa y MLyCS Claudia Maribel Morales Carreón, cuyo gran conocimiento en la materia me guiaron durante el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores de la maestría, a quienes admiro y respeto.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, que me brindó apoyo económico para impulsar mis estudios.

A la empresa, cuyos líderes me retan cada día a ser una mejor persona y una mejor profesional.

A mis amigos, que me inyectan de ánimo cuando más lo necesito.

RESUMEN

Daniela Román Echevarría.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: MINIMIZACIÓN DE COSTOS DE TRANSPORTE EUROPA-MONTERREY.

Número de páginas: 108.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El problema de localización de instalaciones ha sido ampliamente revisado en la literatura. Se presenta el caso de una empresa productora de juguetes de construcción ubicada en el Estado de Nuevo León, cuya cadena de abastecimiento actual consiste en la importación de su materia prima proveniente de Europa, por medio de embarques conocidos como LCL. Para minimizar los costos totales de transporte, se sugiere la activación de centros de consolidación ubicados en las inmediaciones de los puertos de salida utilizados actualmente por la organización. A través de un modelo de programación lineal entera mixta, se analizan los escenarios propuestos y se realiza la recomendación final.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La consolidación de embarques en contenedores exclusivos para la empresa trae como impacto positivo para la cadena de suministro la minimización de los costos totales de transporte, la simplificación del

proceso de importación gracias a la reducción de la cantidad de cargas sueltas a manejar y un potencial decremento en el tiempo tránsito del puerto destino hacia la fábrica en Monterrey, como consecuencia de la eliminación del proceso de desconsolidación de carga. La generalización del modelo base es replicable para casos de estudio que cumplan con los mismos supuestos y sirve también como escalafón sobre el cual, se pueden seguir construyendo y desarrollando adecuaciones para mejorar la representación de la realidad prevaleciente de una empresa y también para mejorar su desempeño computacional, apoyando la toma de decisiones estratégicas.

Se concluye que la propuesta de utilizar centros de consolidación para minimizar los costos totales de transporte de la empresa del caso de estudio arroja resultados positivos, reflejando además del ahorro económico buscado, una propuesta alterna integral para el rediseño de su cadena de abastecimiento.

Firma del asesor: _____
Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al *Council of Supply Chain Management Professionals*, CSCMP (2013), la definición actual de logística cubre dos conceptos principales:

1. Posicionamiento en tiempo (movimiento y colocación) de recursos (personas y bienes).
2. Planeación y organización del abastecimiento y movimiento de los bienes o materiales desde la fuente original a través de las diferentes etapas de la cadena de suministro hasta el consumidor final.

Su injerencia y responsabilidad van más allá del transporte de bienes y materiales. La cadena de suministro es responsable de planear, implementar y controlar de manera efectiva y eficiente el flujo hacia adelante y atrás del almacenamiento, manejo de materiales, cobertura de las órdenes y diseño de los canales de distribución de los bienes, servicios e información manejados entre el punto de origen y el punto de consumo para cumplir con los requerimientos de los clientes. Así mismo, coordina y optimiza todas las actividades en cooperación con otras áreas, como mercadotecnia, ventas, producción, finanzas y servicios tecnológicos. Su alcance incluye la planeación y ejecución estratégica, operativa y táctica.

Una de las actividades de planeación estratégica es la localización de las ins-

talaciones, ya que forma parte del diseño de distribución de los bienes dentro de la cadena de suministro. Daskin *et al.* (2005), consideran que las ubicaciones ineficientes resultan en costos excesivos en los que se incurrirán durante el período de vida de las instalaciones, sin importar qué tan exitosos sean los planes de producción, opciones de transporte y gestión del inventario.

Por tal motivo, seleccionar el lugar indicado para establecer una instalación nueva, llámese centro de distribución, centro de consolidación o fábrica, es una decisión clave para el éxito empresarial.

El presente trabajo expone el caso de una empresa productora de juguetes de construcción que pretende rediseñar el canal de abastecimiento de la materia prima proveniente de Europa hacia Monterrey, Nuevo León; a través de la implementación de centros de consolidación, buscando la minimización de los costos de transporte. Se pretende dar respuesta a cuestionamientos tales como: ¿Qué implicaciones logísticas guarda una decisión de tal magnitud? ¿Qué clase de impactos, desde la perspectiva estratégica, táctica y operativa conlleva?

La necesidad de responder de manera eficiente a los cambios en la demanda, exige que los eslabones de la cadena se encuentren alineados mediante un flujo continuo *end-to-end* de bienes y de información.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La empresa cuenta actualmente con 16 proveedores de materia prima que se encuentran distribuidos en 6 países europeos. El país que alberga la mayor cantidad es Suecia, con 5, proseguido por Dinamarca con 4, mientras que Alemania, República Checa y Hungría, cuentan con dos proveedores cada uno y Austria, cuenta con uno. La distribución se observa en la Tabla 1.1.

En el modelo operativo actual, los proveedores realizan embarques LCL (*Less*

País	Cantidad de proveedores	Porcentaje de participación
Alemania	2	13 %
Austria	1	6 %
Dinamarca	4	25 %
Hungría	2	13 %
República Checa	2	13 %
Suecia	5	31 %
Total	16	100 %

Tabla 1.1: Distribución de proveedores por país.

than a Container Load) hacia la empresa ubicada en Monterrey cada vez que se coloca una orden de compra. La frecuencia semanal de embarque de cada proveedor varía según la necesidad de la empresa por la materia prima respectiva. Cabe resaltar que el volumen enviado también fluctúa entre un proveedor y otro. El mismo comportamiento se encuentra para la cantidad de *pallets* y por ende, el volumen y peso total de los embarques por proveedor. Dado el bajo volumen por embarque de cada uno, se opta por manejar cargas LCL, ya que para que un proveedor complete un contenedor completo con su materia prima, podrían pasar semanas y la demanda de la empresa no sería satisfecha en el momento adecuado. El detalle de los volúmenes y frecuencias de exportación hacia Monterrey durante las 52 semanas del año 2017 se observa en la Tabla 1.2. Así mismo, en la Figura 1.1, se visualizan las discrepancias de peso, volumen, cantidad de *pallets* y frecuencia de embarque por proveedor.

Los embarques LCL son enviados por cada proveedor de manera independiente a 3 puertos: Bremerhaven y Hamburgo en Alemania, y Amberes, Bélgica. Desde cada punto, los envíos son consolidados con cargas de otros clientes, con destino al puerto de Altamira, Tamaulipas, México. Posterior a los procesos de desconsolidación de carga llevados a cabo en el puerto destino, así como de los trámites aduaneros de importación, los *pallets* son transportados vía terrestre hasta las instalaciones de la fábrica en el Estado de Nuevo León.

La consolidación de carga en FCL (*Full Container Load*) contribuiría a la

Proveedor	Peso (kg)	Volumen (m³)	Cantidad pallets	Frec. embarque	País origen
A	23,765.92	108.953	81	25	Suecia
B	20,607.53	43.947	50	12	Hungría
C	19,050.71	35.193	82	25	Austria
D	10,653.68	25.392	62	14	República Checa
E	8,139.25	16.22	20	6	Suecia
F	7,337.00	12.56	13	3	Dinamarca
G	6,280.00	2.739	17	18	Hungría
H	5,638.00	17.264	34	33	Dinamarca
I	5,500.00	7.2	5	4	Dinamarca
J	5,417.16	12.342	10	8	Alemania
K	4,461.00	21.105	30	12	Suecia
L	4,188.00	6.048	7	2	Alemania
M	2,891.00	8.706	7	7	Suecia
N	2,130.00	4.14	4	1	Suecia
O	554.97	14.638	8	7	Dinamarca
P	295.00	0.1	2	2	Dinamarca

Tabla 1.2: Matriz comparativa por proveedor.

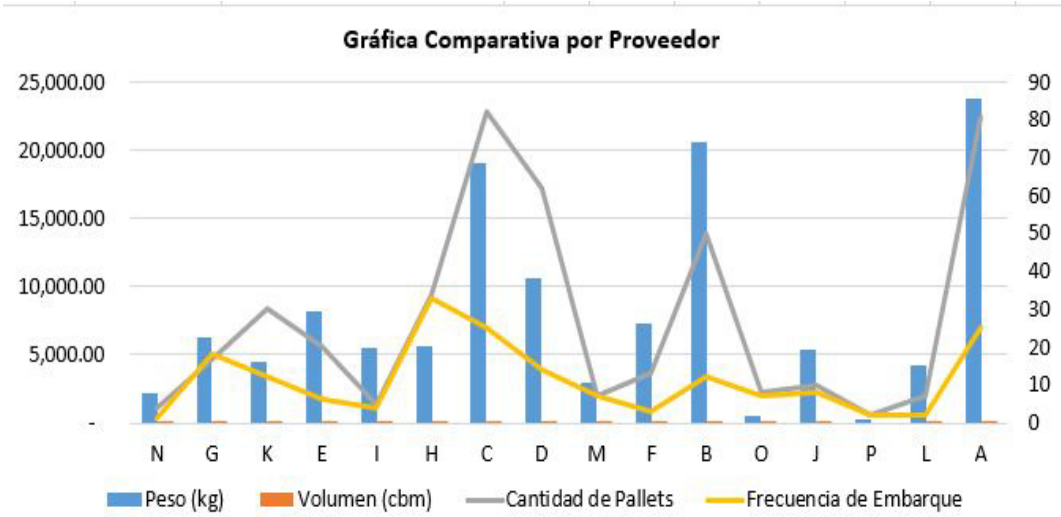


Figura 1.1: Gráfica comparativa por proveedor.

reducción de costos administrativos debido a que los procesos de importación se realizarían por contenedor, cubriendo todos los *pallets* en su interior, a diferencia de la importación LCL, que requiere los mismos procesos de importación, llevados a cabo por cada carga suelta. El tiempo tránsito también puede verse beneficiado ya que el proceso de desconsolidación de las cargas LCL llega a tomar de 7 a 10 días.

El bajo volumen exportado por cada proveedor de manera independiente, impide que se embarquen contenedores completos de un proveedor único hacia Monterrey. ¿Qué pasaría si se consolidara la carga de los diferentes proveedores de tal manera que se completaran embarques FCL hacia la fábrica? Para considerar esta opción, es necesario el establecimiento de un centro de consolidación de carga. El objetivo del mismo, es agrupar la mercancía de los diferentes proveedores en contenedores completos, buscando la minimización de los costos de transporte y la satisfacción de la demanda en la planta.

La problemática se sintetiza en los siguientes puntos:

1. La cantidad de *pallets* embarcada por cada proveedor no es suficiente para completar envíos propios FCL.
2. A través del establecimiento de un centro de consolidación en Europa se agruparía la carga de los proveedores en contenedores exclusivos para la empresa.
3. Es necesario determinar cuál es la ubicación ideal para establecer el o los centros de consolidación.
4. Se debe asegurar que el potencial ahorro económico logístico, consecuencia de la consolidación, no afecte el nivel de inventario de la planta.

1.2 OBJETIVO

Minimizar los costos totales de transporte de Europa hacia la planta de producción en Monterrey mediante una herramienta de optimización que otorgue el patrón de envío ideal por medio de la consolidación de embarques, considerando la capacidad de las instalaciones y satisfaciendo la demanda de la fábrica.

1.3 HIPÓTESIS

Empleando una herramienta de optimización, se minimizarán los costos logísticos de transporte de Europa hacia la fábrica en Monterrey, a través de la determinación de los patrones de envío, considerando la capacidad de las instalaciones y la satisfacción de la demanda.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El efectivo y eficiente transporte de materiales en la cadena de suministro conformada por proveedores, productores, centros de distribución, tiendas minoristas y clientes es crucial para mantener un nivel competitivo en la realidad actual. El transporte es un factor clave que posibilita la entrega en tiempo y forma de materia prima y producto terminado (Crainic, 2003).

Para alcanzar el máximo desempeño logístico, las empresas han desarrollado diversas directrices que apoyan la iniciativa. La consolidación de carga se considera como una estrategia logística que busca incrementar el nivel de competitividad de las organizaciones, aprovechando las economías de escala y reduciendo los tiempos tránsito. De acuerdo a Çetinkaya (2005), existen dos enfoques: políticas puras y políticas integrales.

Las políticas puras de consolidación se basan en la acción de aglomerar y enviar la carga para satisfacer la demanda de los clientes en el momento que sea necesario, sin que se tomen en cuenta las implicaciones en otra áreas de la organización, por ejemplo, en el almacén. Por otro lado, las políticas integrales reconocen que para desarrollar una visualización holística de la cadena de suministro se requiere una decisión coordinada entre diferentes áreas de la empresa: compras, manufactura, ventas, distribución, entre otras (Boyaci y Gallego, 2002). La coalición entre las decisiones de consolidación de carga y el manejo de los inventarios son ejemplos de políticas integrales.

En el eslabón de abastecimiento de la materia prima de las empresas, la activación de centros de consolidación pueden contribuir a la amortiguación de la complejidad de su cadena de suministro, porque centraliza la carga en puntos determinados desde los cuales se puede ejercer un mejor control, beneficiando el rendimiento total. Desde la perspectiva administrativa, al manejar cargas consolidadas en FCL, la cantidad de operaciones de importación podrían reducirse.

En el caso de estudio, el canal de distribución actual de los proveedores europeos hacia la empresa consiste en frecuentes embarques de cargas sueltas o independientes. Considerando un contenedor con capacidad de 40 *pallets* (denominado 40 estándar o 40 ST), se presenta en la Tabla 1.3, la relación del costo unitario en dólares americanos por *pallet* entre los embarques LCL y FCL.

Tipo de carga	Costo
<i>Pallet</i> LCL	253
Contenedor FCL	2500
<i>Pallet</i> FCL	63

Tabla 1.3: Costos comparativos en embarques LCL y FCL.

Cada *pallet* enviado bajo el esquema LCL es más caro que el transporte de un *pallet* de un embarque FCL. Por lo tanto, se infiere que si se consolidara la carga de los proveedores europeos en FCL, sería posible generar ahorros logísticos. Empero, la reducción de costos de transporte no es el objetivo último de la consolidación,

sino que se persigue el establecimiento de la política de envío que propicie el balance entre los costos logísticos y la gestión de los inventarios en la empresa.

Utilizando una herramienta analítica es posible evaluar el uso de centros de consolidación que permitan rediseñar el canal de abastecimiento de la empresa, asegurando el cumplimiento de la demanda, respetando la capacidad de las instalaciones, mejorando la gestión de inventarios y reduciendo los costos logísticos totales. Se pretende que el beneficio se extienda hacia la máxima cantidad posible de eslabones de la cadena.

1.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología empleada para el desarrollo del presente caso de estudio comenzó con la definición del problema real de la empresa. Posteriormente, se realizó una revisión de la literatura como ejercicio de *benchmarking* respecto a problemáticas similares. Después, se seleccionó la herramienta a utilizar. Se recopilaron y ajustaron los datos para así, dar paso a la experimentación. Conforme se iban generando las instancias y se obtenían resultados, se realizaban ajustes del modelo y se procedió con el desarrollo de 3 escenarios. Finalmente se analizaron los resultados de las instancias y se seleccionó la mejor opción para la empresa. Las aportaciones y recomendaciones para trabajos futuros también se incluyeron.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo cuenta con 6 capítulos. En el capítulo 1, se presenta la introducción, definiendo el problema a resolver y su relevancia. En capítulo 2, se desarrollan los antecedentes del problema, recopilando la revisión de la literatura y concluyendo con la designación de la herramienta a emplear. La descripción del modelo matemático se desglosa en el capítulo 3. En el capítulo 4 se encuentra el

desarrollo de los escenarios a analizar. En el capítulo 5, se presentan los resultados y finalmente, en el capítulo 6 se muestra la recomendación final, las aportaciones a la cadena de suministro y el trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

El movimiento de los bienes y de la materia prima desde los proveedores hasta las plantas productivas y de procesamiento, así como el ensamble del producto terminado y su envío hacia centros de distribución, comercializadoras y finalmente, hasta el consumidor final, se convierten en actividades críticas que podrían repercutir en la ventaja competitiva de las empresas (Daskin *et al.*, 2005).

La cadena de suministro no solamente se limita al movimiento de los bienes, sino también, a la toma de decisiones trascendentales, tales como: ¿qué, cuánto y dónde producir? Así mismo, controla la cantidad de productos que se deben de mantener en inventario en cada etapa del proceso, determina cómo compartir la información entre los participantes en el flujo y finalmente, define dónde ubicar las plantas y los centros de distribución (Daskin *et al.*, 2005).

Los primeros planteamientos del problema de localización de instalaciones se remontan al siglo antepasado. Los especialistas en geografía económica comenzaron a realizar cuestionamientos sobre la renta y como ésta era influenciada por la ubicación. Los clásicos modelos de ubicación son el precedente de los actuales problemas de localización de instalaciones y han sentado las bases para su estudio y el perfeccionamiento de su solución.

2.1 DE LOS MODELOS CLÁSICOS A LOS MODERNOS

De acuerdo a Parker (2007), desde hace ya varios años, antes de que incluso el término logística llegara al mundo académico y empresarial en su concepción actual, los científicos y pensadores ya se encontraban trabajando en el análisis y comprensión de fenómenos relacionados con la maximización de las ganancias a través de la eficiencia del uso de recursos disponibles, considerando determinadas circunstancias afines a la época y al tipo de actividad económica bajo estudio.

Decisiones relacionadas con la ubicación como dónde sembrar determinado cultivo o el impacto que tenía la distancia entre los participantes de la cadena sobre el beneficio económico, formaban parte de los problemas logísticos y de geografía económica que antiguamente acecharon a los científicos y que los llevaron al desarrollo de herramientas clásicas de solución para problemas de localización. Posteriormente, los supuestos originales fueron adaptados a la realidad prevaleciente y nuevas teorías de la ubicación se desarrollaron para dar paso a la descomposición de complejos problemas que contribuyeran a su interpretación de una manera más eficiente y exacta.

El desarrollo cronológico de las principales teorías de la ubicación, se explican a continuación.

2.1.1 MODELOS CLÁSICOS DE UBICACIÓN

A lo largo de la historia, el hombre ha intentado comprender los diferentes fenómenos de la naturaleza. Una manera práctica de analizar la realidad es través de su representación teórica. La teorización es el proceso por medio del cual, los fenómenos cotidianos pueden ser modelados para conseguir su fragmentación, análisis y comprensión. Gracias a ella, es posible contemplar escenarios futuros, basándonos en representaciones actuales y con esto, lograr tomar decisiones (Parker, 2007).

La teorización deductiva es el proceso por medio del cual, a partir de principios generales, y con la ayuda de una serie de reglas de inferencia, se demuestran teoremas o principios secundarios. Las variables clave son identificadas, se elaboran suposiciones y se obtienen conclusiones lógicas sobre la conducta de las variables.

La teoría clásica de la ubicación conforma el fundamento deductivo sobre el cual se sostienen las teorías modernas de la ubicación.

Tres son los personajes pioneros de la teoría de ubicación, cuyos modelos deductivos se han convertido en hitos para las teorías de localización modernas: Johann Heinrich Von Thünen, Alfred Weber y Walter Christaller. Cada uno desde diferentes ámbitos y apoyándose en la realidad y recursos de su época, han explicado las relaciones existentes entre los parámetros y variables que interactúan entre sí.

Von Thünen expone su teoría desde la perspectiva agrícola: ¿De qué manera la renta podría estar influida por el tipo de cultivo sembrado en determinadas áreas? ¿Cómo influye la distancia entre la zona de cultivo y el mercado sobre el total del ingreso económico?

Alfred Weber, por otro lado, retoma el mismo conflicto del espacio y la renta desde una perspectiva industrial: ¿Realmente son los recursos del medio ambiente ubicuos como lo expresaba Von Thünen? ¿Qué papel desempeñan en la renta la ubicación de los recursos naturales, el mercado y las plantas productivas?

Finalmente, Walter Christaller nos remonta hacia los inicios de la primera teoría de urbanización. ¿Cuál es la cantidad mínima de personas requeridas para asegurar la rentabilidad de un centro de servicio? ¿Cuál es la distancia máxima que el consumidor está dispuesto a desplazarse para obtener un bien?

2.1.1.1 MODELO DEL USO DE LA TIERRA: JOHANN HEINRICH VON THÜNEN.

A Johann Heinrich Von Thünen se le atribuye la autoría de la primera teoría de la ubicación.

En 1826, publicó su obra *El Estado aislado* (Thünen y Perthes, 1826). El enfoque es meramente agrícola y explica el modelo de renta de ubicación, en el que pone en escena a un estado hipotético que se encuentra aislado de otros similares. En esta obra, el autor sustituye una práctica cerrada o autárquica de la agricultura, por modelos de mercado que interactúan con la sociedad a través de las relaciones de producción, transporte y venta. En su primer volumen, explica cómo los costos de los productos agrícolas inciden sobre la asignación de la distribución espacial de cada producto, convirtiendo a la variable «distancia» como la única capaz de impactar el valor de la renta agrícola.

El modelo desarrollado considera una importante influencia a la que llama «resistencia colectiva», la cual, consiste en la necesidad de la sociedad de siempre buscar la mitigación de esfuerzos innecesarios para lograr una mayor efectividad en sus procesos. Un ejemplo de esto podría ser transportar los bienes utilizando la ruta más corta, lo cual, conlleve a una reducción del esfuerzo del movimiento y un decremento de los costos de transporte. La resistencia colectiva provoca una inclinación hacia la búsqueda de la eficiencia en los recursos y la maximización de los beneficios (Thünen y Perthes, 1826).

Las suposiciones del modelo del uso de la tierra son:

- Todas las personas tienen consumos e ingresos similares, se conducen de manera parecida en los asuntos económicos, cuentan con habilidades de producción semejantes e intentan maximizar sus ingresos.
- Los agricultores están perfectamente informados sobre todas las posibilidades

de cultivo para lograr la maximización de sus ganancias.

- Existe un excedente de producción.
- El hombre económico habita en una planicie isotrópica, en el que las personas, características del medio ambiente y los recursos naturales se distribuyen de manera uniforme. La calidad de la tierra y su fertilidad es la misma en toda la llanura.
- El mercado compra toda la producción agrícola.
- El transporte de las granjas hacia el poblado se realiza por las rutas más cortas.
- No existen restricciones de barreras naturales.
- Los costos de transporte se encuentran en función de la distancia en línea recta y cuentan con diferentes tasas dependiendo del tipo de mercancía.
- Los costos de transporte se ven influenciados por la condición de perecederos y el peso neto de los cultivos.
- El sistema es cerrado y no recibe influencia del exterior.
- La distancia actúa como variable única desde la granja hasta el pueblo central.

El valor de los parámetros del modelo dependerá de las características físicas y geográficas de la zona agrícola. Estos factores, determinarán el tipo de cultivos y la ubicación apropiada para que puedan desarrollarse de una manera económicamente viable.

Solamente la distancia funge como variable. Von Thünen asegura que la distribución espacial de la actividad agrícola se producirá en función de los costos de transporte. Esta condición es esquematizada por una serie de círculos concéntricos, como los presentados en la Figura 2.1, que generan rentas más bajas entre más alejados estén del centro, donde se encuentra el mercado. Los círculos próximos a él, corresponden a actividades intensivas en capital y con elevados costos de transporte.

A medida que se van alejando hacia el exterior, dan paso a círculos con actividades agrícolas de corte extensivo, cuyos costos de transporte son inferiores.



Figura 2.1: Círculos concéntricos del estado aislado.

Fuente: Parker (2007).

Para plantear el modelo de uso múltiple de la tierra, se establecen como ejemplo dos tipos de cultivos: tomate y trigo. Dadas sus características intrínsecas, como peso, delicadeza en su estructura y condiciones de alimentos perecederos, se logra determinar la ubicación adecuada de cada uno en los anillos concéntricos que se localizan alrededor del mercado, de tal manera que se garantice su mayor rendimiento de ubicación.

El tomate es una fruta perecedera que requiere de una manipulación más cuidadosa que los granos de trigo, además de que su proceso de maduración es más acelerado, por lo que necesita de una menor distancia al mercado. Considerando que el mercado se ubica al centro del círculo en la Figura 2.1, la siembra de tomate se ubicaría en el anillo inmediato a éste.

Por otro lado, el trigo puede ubicarse en el siguiente círculo concéntrico posterior al del tomate, con una mayor distancia al mercado, ya que al requerir de un

nivel de cuidado inferior en su manipulación, el costo de transporte disminuye, permitiendo que la distancia sea mayor en comparación a la del tomate y que aún así, se maximice el valor de la renta.

En el segundo volumen de su obra Thünen y Rostock (1842), introdujeron ciertas perturbaciones que provocaron cambios en los resultados de la renta de ubicación. Factores como un río que atraviesa el estado, el ferrocarril o la navegación a vapor influyeron sobre los primeros resultados obtenidos en el primer volumen de la obra. Dichas alteraciones, provocan la eliminación de los círculos concéntricos y de las condiciones homogéneas de fertilidad y calidad de la tierra.

¿Revela el modelo del uso de la tierra de Thünen y Rostock (1842), y Thünen y Perthes (1826), una situación real actual? La respuesta es afirmativa. La razón es que la teorización del modelo de la renta agrícola permite ejemplificar las condiciones que actualmente pueden ser observadas, sobre todo en los países en vías de desarrollo, es decir, la asignación de qué cultivar y en dónde, se determina con base a la distancia que se tiene con el mercado, la cual a su vez, establece los costos de transporte intrínsecos a cada tipo de cultivo (Parker, 2007).

La teoría de la renta de ubicación propuesta por Von Thünen guarda gran congruencia con su época. Hoy en día, sirve como marco de referencia para el planteamiento de problemas de ubicación.

2.1.1.2 TEORÍA DE LA UBICACIÓN INDUSTRIAL: ALFRED WEBER

A inicios del siglo XX, las características y condiciones de la Alemania en la que vivió Von Thünen al momento de crear su modelo de ubicación de la tierra eran completamente diferentes. En tiempos de Weber, el país se encontraba en crecimiento industrial y su economía estaba volcada hacia este tipo de actividades. Los asentamientos humanos se ubicaban con mayor propensión hacia los núcleos de carbón y hierro, los cuales, conformaban la materia prima base empleada para alimentar a la

industria de aquellos años que se encontraba en expansión (Parker, 2007).

Bajo estas condiciones, Alfred Weber publicó en 1929 la *Teoría de la ubicación industrial* (Weber, 1929). La variable «distancia» continuaba fungiendo una importante labor en la determinación de la ubicación de las instalaciones, sin embargo, nuevos supuestos se agregaron y algunos otros fueron modificados para reflejar la realidad y las condiciones prevalecientes del país en aquel momento.

Alfred Weber se cuestionó sobre la posibilidad de que la dotación de recursos naturales en cantidad y calidad fuera variable dentro del espacio geográfico, a diferencia de las características isotrópicas contempladas en el modelo de la renta agrícola de Thünen y Perthes (1826).

En términos espaciales, si la decisión de localización de las empresas industriales está en función de que se maximice su ganancia, esto implicaría determinar qué localización le permitirá alcanzar dicho objetivo. De acuerdo con el razonamiento de Weber (1929), si los recursos fuesen ubicuos, no existiría un problema de localización de instalaciones, ya que las empresas no tendrían sitios alternativos que las atrajeran. Bajo este escenario, la decisión de ubicación solamente consideraría la distancia al mercado. El problema de localización industrial solamente se plantea si existen en el espacio recursos localizados.

Por esta razón, el modelo de ubicación industrial de Weber (1929), enfatiza que existen dos factores principales que influyen en la maximización de la renta de las instalaciones industriales: la localización de los recursos y la distancia hacia el mercado. El objetivo final es determinar la ubicación ideal de las instalaciones que conlleven hacia la maximización de las ganancias, minimizando los costos de transporte.

Los supuestos del modelo de ubicación industrial de Weber (1929) son:

- Los centros de mercado están fijos en el espacio.

- La ubicación de la industria es influenciada por la ubicación de los mercados y de la mano de obra.
- El ambiente natural no es homogéneo.
- Los costos de transporte y distancia conforman la principal variable del modelo.
- Los recursos son localizados y no ubicuos.
- La mano de obra calificada es ilimitada y es incorporada al modelo como variable que impacta directamente los costos totales.

El problema de ubicación de Weber (1929), consiste en encontrar el punto ideal para la ubicación de la fábrica, de tal manera que se minimicen los costos del transporte de la materia prima a la planta productiva y de ésta, hacia el mercado. Los costos del transporte están en función de la distancia y del peso transportado entre las diferentes estaciones.

En la Figura 2.2, se observa que M_1 y M_2 representan las ubicaciones de los materiales 1 y 2. El punto P , representa la planta productiva, mientras que en el punto C , encontramos al mercado. Las distancias de los recursos localizados y del mercado hacia la planta de producción, están representados por a , b y c , mientras que los pesos de las materias primas transportadas desde M_1 y M_2 hacia P , están representadas por x , y . El mismo concepto de la planta hacia el mercado, se indica en el punto z (Weber, 1929).

Para encontrar la localización óptima de P que minimice los costos se tiene que:

$$xa + yb + zc$$

A pesar de que el modelo weberiano no incluye consideraciones como los ahorros en grandes cargamentos, la disponibilidad de los recursos ni las economías de escala, sus ideas han sentado el precedente para muchos autores que han decidido profundizar en el análisis de problemas de ubicación.

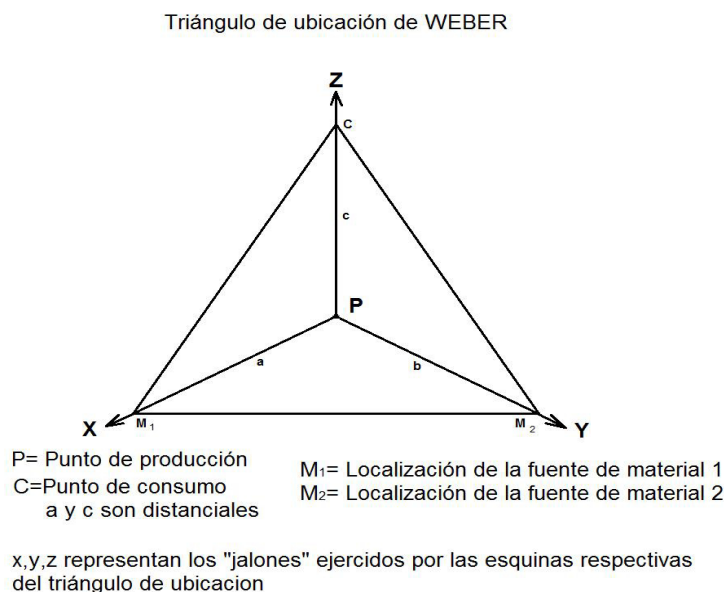


Figura 2.2: Triángulo de ubicación de Weber.

Fuente: Parker (2007).

2.1.1.3 TEORÍA DEL LUGAR CENTRAL POR WALTER CHRISTALLER

Después de un siglo de la publicación de *El Estado aislado* (Thünen y Perthes, 1826) y una generación posterior a la obra de Alfred Weber (Weber, 1929), Christaller (1933) publica *Los lugares centrales en Alemania meridional*. Según la opinión de muchos expertos, es la contribución más importante hecha hasta ahora respecto a la localización en los lugares urbanos.

La teoría del lugar central se refiere a la distribución espacial de la demanda del consumidor en el mercado, así como los patrones de ubicación de las empresas de servicio y manufactura. El enfoque de la teoría central es el mercado, suposición que no era contemplada por Weber dentro de su modelo de ubicación industrial.

El modelo del lugar central logra explicar dos aspectos importantes (Christaller, 1933):

1. La ubicación de los asentamientos urbanos como centros óptimos de localización para las empresas de servicios y de manufactura.
2. La manera en la que estos servicios se distribuyen dentro de los asentamientos humanos.

La teoría del lugar central sustenta que el tipo de servicios ofrecidos en los asentamientos humanos dependerán del tamaño de dicha aglomeración. Es decir, en un pueblo con pocos habitantes, se podrán encontrar servicios básicos, como una gasolinera o un supermercado. Si la cantidad de habitantes aumenta en otra ubicación, existirían servicios más avanzados, como los de algún profesional, por ejemplo, un abogado. Si lo que se requiere es una atención de alta especialidad, como un hospital, con certeza podrá ser localizado en una ciudad con mayor cantidad de habitantes (Parker, 2007).

¿Existen leyes que determinen el tamaño, número y distribución de los poblados? ¿Por qué existen poblaciones grandes y pequeñas, y por qué están distribuidas tan irregularmente? Christaller trató de dar respuesta a estas interrogantes con la teoría del lugar central.

Las suposiciones del modelo de Christaller (1933) son las siguientes:

- Los hombres económicos están distribuidos de manera uniforme en una planicie sin límites.
- Los recursos se encuentran distribuidos de una manera regular y son ubicuos.
- Los costos de transporte son una función lineal que dependen solamente de la distancia de un punto a otro.
- En un punto central surge un hombre emprendedor que desea producir un excedente de algún tipo de producto para ponerlo a la venta.
- Los gastos de la venta deben de contar con un punto de equilibrio.

El modelo del lugar central cuenta con dos parámetros principales: umbral de la demanda y el alcance físico del mercado de una mercancía o servicio. El umbral de la demanda se define como la cantidad mínima de población que se requiere para que la empresa que ofrece el servicio alcance el punto de equilibrio. El punto de equilibrio se refiere al punto en el cual, los gastos por vender los excedentes al mercado se cubren gracias al total de ventas (ingresos) recibidos (Christaller, 1933).

El alcance físico se refiere a la distancia máxima que el consumidor estaría dispuesto a trasladarse (o pagar) para obtener el bien o servicio determinado, como se muestra en la Figura 2.3.

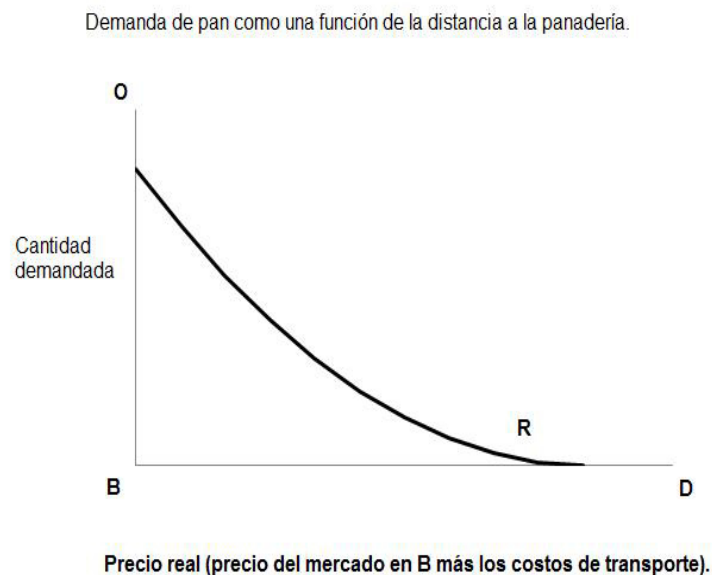


Figura 2.3: Curva de la demanda de Christaller.

Fuente: Parker (2007).

Gracias a la teoría del lugar central, Christaller se considera como uno de los principales aportadores de un modelo teórico que ha contribuido a mejorar la comprensión del proceso de urbanización.

2.1.2 RELEVANCIA DE LAS TEORÍAS CLÁSICAS DE LA UBICACIÓN

De acuerdo a la información observada en la Tabla 2.1, cada uno de los autores previamente mencionados, se orienta hacia un campo en particular. A través de los años, se pasó del análisis de la agricultura, hacia la evolución industrial, llegando hasta la distribución urbana. Cada uno de estos enfoques guarda características específicas que contribuyen y enriquecen los modelos desarrollados. La convergencia existente entre ellos, es la búsqueda de la maximización de las ganancias.

Gracias al surgimiento e interpretación de las teorías de la ubicación, se ha conseguido simular la realidad para simplificarla y comprenderla. Con el paso de los años y el desarrollo de nuevos métodos y herramientas, el problema de localización de instalaciones ha ido evolucionado, incorporando nuevos supuestos a la medida de la realidad que se desea representar. La relevancia de las teorías clásicas de la ubicación radica en que gracias a la acumulación del conocimiento científico con el paso de los años, se permite la construcción y el desarrollo de nuevas ideas, partiendo de una base firme. El planteamiento de nuevos problemas en la realidad pueden ser comparados con los trabajos previamente analizados, rescatando aquello en lo que se guarda similitud y ajustando las herramientas a los supuestos actuales.

2.2 PROBLEMA DE LA LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES

La teoría de localización industrial de Weber (1929), indica que los recursos requeridos por las fábricas carecen de ubicuidad y que entre mayor distancia exista entre la planta productiva, los proveedores y el mercado, mayores serán los costos logísticos y menor el rendimiento de la organización. ¿Qué sucede cuando los recursos que una fábrica requiere no se ubican en las cercanías de la misma, sino, en otra ciudad o continente? ¿De qué manera se logra la maximización de la ganancia

Modelo	Modelo del uso de la tierra	Teoría de la ubicación industrial	Teoría del lugar central
Autor	Johann Heinrich Von Thünen	Alfred Weber	Walter Christaller
Obra	El Estado aislado	Teoría de la ubicación industrial	Los lugares centrales en Alemania meridional
Año	1820	1929	1933
Enfoque	Agrícola	Industrial	Urbano
Características generales	Estado aislado, condiciones isotrópicas (cantidad y calidad de recursos), sin barreras naturales, recursos ubicuos.	Centros fijos de mercado, condiciones variables (cantidad y calidad de recursos), recursos localizados.	Planicie sin límites, recursos ubicuos.
Variables y parámetros	Distancia al mercado, tasa del transporte.	Distancia al mercado, localización de los recursos, peso total de los recursos a transportar, tasa de transporte.	Distancia entre los centros de servicio, umbral de la demanda, alcance físico.
Objetivo del modelo	Seleccionar qué y dónde sembrar para maximizar la renta.	Determinar ubicación ideal de instalaciones para maximizar ganancia industrial.	Analizar la distribución y funciones de los asentamientos humanos.

Tabla 2.1: Matriz comparativa de las teorías clásicas.

expresada por Weber en su modelo?

El constante cambio en los gustos del consumidor ha acelerado los ciclos de innovación y producción en los últimos años. Las tendencias de hoy pasan a ser obsoletas al poco tiempo de haber sido lanzadas al mercado, razón por la cual, las empresas deben de buscar las alternativas necesarias para poder seguir el paso acelerado de los consumidores o de otra manera, serán arrastrados por la competencia. Esta necesidad de flexibilización de la cadena de suministro ha reducido la ventana de tiempo de respuesta en el que las empresas pueden reaccionar para entregar en tiempo y forma sus productos. El escenario se complica aún más cuando la materia prima requerida no se encuentra a su alcance de manera expedita, como generalmente se pretende al desarrollar proveedores cercanos a la fábrica, sino que, por el contrario, es indispensable transportarla, a veces, desde el otro lado del mundo. Conceptos como niveles de inventario, transporte multimodal, centros de distribución, tiempo tránsito y *leadtime* adquieren mayor relevancia en el eslabón logístico.

La importancia de la determinación de nuevas instalaciones, llámese centro de distribución, centro de consolidación o nave industrial, radica en la trascendencia de la decisión en sí. El transporte o el nivel de inventario de una empresa son conceptos que pueden ser relativamente fáciles de ser modificadas en un corto o mediano plazo como consecuencia del cambio en la disponibilidad de la materia prima, los costos de mano de obra o de las tarifas de transporte, tipos de cambio o costos por mantener el inventario. Su re-optimización es, hasta cierto punto, fácil de emprenderse y sus impactos generalmente no son considerados como irreversibles para la organización (Daskin *et al.*, 2005).

A diferencia de este tipo de decisiones sobre el transporte o los inventarios, la localización de instalaciones afecta en el largo plazo a la compañía, ya que sus consecuencias durarán el tiempo que dicha instalación se mantenga en funcionamiento. Por más excelente planeación, control de inventarios o tarifas ofrecidas por los transportistas, las instalaciones mal ubicadas obstaculizan el desempeño de las empresas

y provocan importantes fugas de capital de tipo fijo y variable: el primero, porque se realizó una inversión para la edificación de una instalación que resultó ser inadecuada y el segundo, porque en la operación diaria el rendimiento no es el óptimo, incurriendo en gastos adicionales de almacenamiento y/o transporte.

La descripción general del problema de localización de instalaciones es la siguiente (ver Figura 2.4): dado un conjunto de ubicaciones discretas de proveedores y un conjunto de ubicaciones potenciales para las instalaciones, se busca minimizar los costos de transporte a través de la determinación de las políticas de envío entre los proveedores y las instalaciones potenciales, considerando las capacidades de las instalaciones y la satisfacción de la demanda de la fábrica (Daskin *et al.*, 2005).

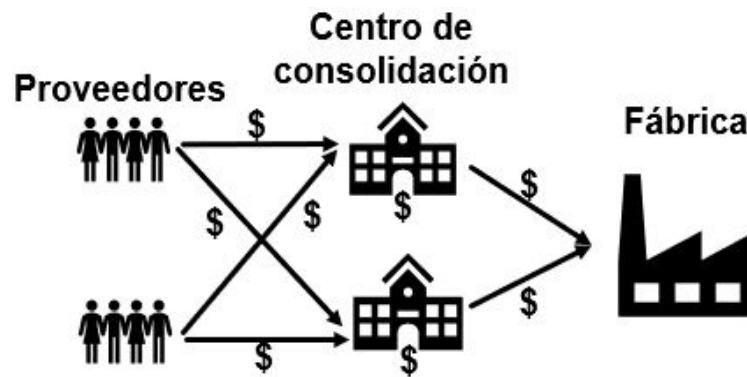


Figura 2.4: Ejemplo de localización de instalaciones para centros de consolidación.

Existen dos enfoques para resolver el problema de localización de instalaciones: métodos cualitativos y cuantitativos. Las alianzas o fusiones entre ellos darán siempre resultados más robustos que la aplicación de cada método de manera aislada e independiente.

2.2.1 MÉTODOS CUALITATIVOS

Se enfocan en datos o información catalogada como «suave» o subjetiva, ya que no se determina basándose en el análisis numérico, sino, como parte de un proceso de apreciación llevado a cabo por la empresa para lograr determinar la ubicación

adecuada de las nuevas instalaciones. Entre los aspectos cualitativos considerados en esta corriente, de acuerdo a Sule (2001), encontramos:

1. Instalaciones de transporte: la zona debe contar con la infraestructura necesaria para garantizar la movilidad de la materia prima, el producto terminado y las personas.
2. Oferta de mano de obra: la disponibilidad del recurso humano calificado en los alrededores de la zona elegida impulsará el desarrollo y mantenimiento de la nueva instalación.
3. Disponibilidad de tierra y espacio: la topografía y las características del suelo deben de ser evaluadas por la organización, ya que podrían influenciar el costo del espacio. Se debe contar preferencialmente con la posibilidad de expansión, previendo el futuro crecimiento de la organización.
4. Cercanía al mercado: entre mayor proximidad y accesibilidad se tenga al mercado meta, menores serán los costos logísticos asociados al movimiento de las mercancías y mejor será la velocidad y flexibilidad de respuesta hacia la demanda. Para productos a granel, se recomienda ubicarse cerca del mercado para reducir los costos de transporte. Por el contrario, en los artículos de alto contenido de valor agregado, dichos costos de transporte no son un factor crítico de decisión.
5. Recursos accesibles (gas natural, agua, carbón, madera, etc.): la disponibilidad de los recursos básicos para que funcionen las nuevas instalaciones debe estar asegurada. Se debe considerar el manejo de los desechos.
6. Cercanía a la materia prima: permite una reducción de los costos logísticos asociados a su transporte, además fortalece la flexibilidad a los cambios de la demanda y la reducción de altos niveles de inventarios. Cuando el movimiento de la materia prima representa un mayor costo de transporte que el del pro-

ducto terminado, la ubicación de la instalación se inclinará hacia este punto, para reducirlo.

7. Consideraciones climatológicas: pueden influir en el tipo de producto a fabricar y comercializar. Las instalaciones deberán contar con adecuaciones en su interior de acuerdo con las condiciones prevalecientes de la zona.
8. Impuestos y consideraciones legales: es indispensable revisar los requerimientos legales de la zona, de tal manera que se asegure su cumplimiento. Cada ciudad alberga diferentes lineamientos en cuanto al pago de impuestos por ingresos, propiedades y ventas.
9. Consideraciones sociales: lograr mantener el equilibrio y balance de la sociedad con la llegada de una nueva instalación es una responsabilidad de la organización. La edificación y mantenimiento de espacios culturales, librerías e instalaciones recreativas, son necesarias para mantener la motivación de los trabajadores que vivan cerca de la potencial instalación.
10. Cercanía a otras plantas: es necesario considerar la ubicación de otras naves productivas, ya sea de la misma empresa o de otras industrias que requieran mano de obra calificada similar, con la intención de no competir por el mismo recurso calificado.

Aunado al listado anterior, cuando se habla de empresas multinacionales que desean instalarse en algún país en desarrollo, se consideran de manera adicional otra serie de conceptos, por ejemplo: estabilidad política, compromiso del gobierno local, adaptabilidad a la tecnología, influencia de la economía local, ciclo de vida del producto por parte de la competencia, posibilidad de reimportar la producción y la cultura prevaleciente en el país (Sule, 2001).

Los métodos cualitativos tienen gran importancia en la toma de decisiones y deben actuar como el complemento de los métodos cuantitativos para robustecer la elección.

2.2.2 MÉTODOS CUANTITATIVOS

Los métodos cuantitativos consideran datos «duros» para la modelación y obtención de resultados exactos o aproximados. Para Ballou (2004), los métodos cuantitativos albergan una serie de características básicas:

1. Fuerza impulsora: ¿cuál es la motivación para ubicar las instalaciones? Para una instalación de ventas al menudeo, podría ser el ingreso por zona, mientras que, para instalaciones de servicios como escuelas, hospitales o cajeros automáticos, podría ser la accesibilidad para la población.
2. Número de instalaciones: la complejidad del problema aumentará de acuerdo con la cantidad de instalaciones a ubicar. Entre mayor sea la cantidad de datos, mayor acumulación de ellos será requerida para obtener el resultado.
3. Lo discreto de las opciones: si se conocen los puntos de demanda y de localización, son discretos, de lo contrario, continuos.
4. Horizonte de tiempo: son estáticos si los parámetros del problema no se modifican con el tiempo, de lo contrario, se consideran dinámicos. Estos a su vez se subclasifican en dinámicos implícitos, cuando las ubicaciones son estáticas y se abren en un horizonte de tiempo determinado, pero los parámetros como distancia y tiempo tránsito cambian. Los dinámicos explícitos son las ubicaciones que podrían cerrarse y abrirse en el horizonte de tiempo dado (Current *et al.*, 1998).

Los métodos cuantitativos tienen la característica de modelar la realidad de una manera abstracta que simplifica el problema y lo resuelve de una manera eficiente. La modelación matemática es un intento por describir una parte del mundo real en términos matemáticos, donde se establecen un conjunto de relaciones de igualdad y/o desigualdad, dentro de un conjunto de variables (Martin, 1999).

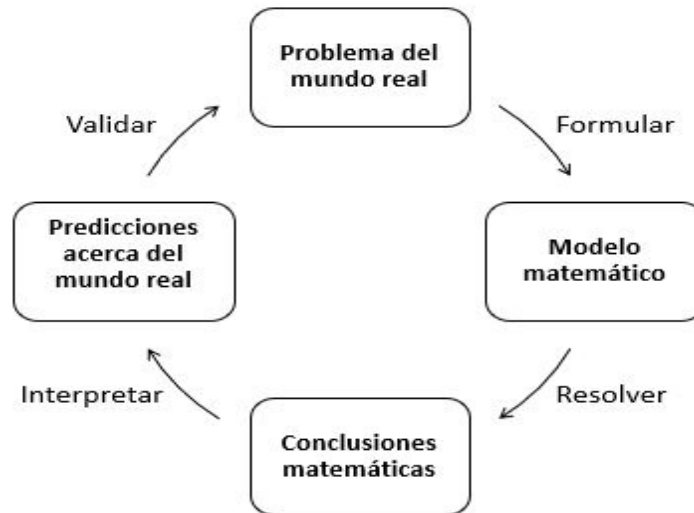


Figura 2.5: Proceso de modelado.

Fuente: Elaboración propia basada en información de Martin (1999).

Dado un problema del mundo real, se formula un modelo matemático que ayude a representarlo. Se le incorporan variables y parámetros, y se establece una hipótesis que contribuya a la simplificación del problema para resolverlo de una manera eficiente. Las conclusiones matemáticas obtenidas son interpretadas, brindando soporte para la toma de decisiones en el mundo real. El proceso de modelado no es un ciclo cerrado, sino uno de mejora continua que está en constante movimiento y que se reinicia en el punto requerido, modificando todo lo que se encuentre posterior a esto (ver Figura 2.5).

Los métodos cuantitativos se subdividen en aproximados y exactos.

2.2.2.1 MÉTODOS CUANTITATIVOS EXACTOS

Su principal característica es la capacidad de encontrar la solución óptima. Su tiempo de resolución puede llegar a ser alto, dependiendo del tamaño del problema.

La representación de la realidad en su modelación es algunas veces difícil de ser alcanzada totalmente, esto, como consecuencia de su nivel de complejidad (Ballou, 2004).

Según el comportamiento de los parámetros, se encuentran modelos dinámicos y estocásticos. La diferencia entre ellos es que los dinámicos conocen con certeza los cambios de los parámetros a través del tiempo. Ellos se subdividen en implícitos, cuando las instalaciones sufren cambios en el tiempo y explícitos, cuando no. Por otro lado, los modelos estocásticos reconocen que existen cambios, sin embargo, de acuerdo a su planteamiento teórico, existe un grado de incertidumbre respecto a parámetros como la demanda, el tiempo tránsito, los costos fijos de las instalaciones, la distancia y la disponibilidad del servicio en cada instalación. Es decir, los estocásticos reconocen el cambio de los parámetros, pero desconocen de qué manera lo hacen.

Durante la segunda mitad del siglo pasado, en el mundo científico surgió una explosión tanto en metodología como en implementación de la misma para resolver problemas reales. Gracias a ello, planteamientos que anteriormente eran muy difíciles de solucionar debido a su alta complejidad computacional, hoy en día pueden ser manejados desde un simple equipo de escritorio (Martin, 1999).

El origen de este movimiento se remonta a 1945, cuando George Joseph Stigler publicó su libro «*Cost of subsistence*» (Stigler, 1945), en el cual, formuló el famoso *problema de la dieta*, que consistía en construir un menú que satisficiera una docena de requerimientos nutrimentales a un costo mínimo. Esto se planteó como un problema de optimización lineal.

A la par del desarrollo de Stigler (1945), George Dantzig estaba tratando de encontrar una solución rápida a situaciones relacionadas con el despliegue militar, de problemas de logística y de la cadena de suministro, hasta que se percató de que muchos de éstos podían ser planteados a través de un sistema de desigualdades lineales (Martin, 1999). En 1947, Dantzig formalizó este concepto y lo llamó

«programación lineal» (*linear programming*), también conocida como LP. En LP, se plantea un problema con un objetivo lineal, sujeto a la resolución de un sistema de ecuaciones lineales y desigualdades.

Dantzig no solamente formalizó el término LP, sino que desarrolló un método de solución conocido como **algoritmo simplex**. El primer problema a gran escala resuelto con él, fue el de la dieta de Stigler (1945), cuyo nivel de complejidad era de 9 ecuaciones y 77 variables no negativas (Martin, 1999).

Quienes comenzaron a trabajar con LP, se dieron cuenta de que en algunas ocasiones, los valores fraccionados de las variables de decisión no hacían sentido. Comúnmente, redondear variables de decisión fraccionadas hacia el resultado entero próximo, implicaba inexactitud en las soluciones. Cuando en ellas se representaba el abrir un almacén o no, o invertir en un proyecto o no, era importante restringirlas a que fueran enteras, ya que el redondeo las podría orillar a obtener resultados infactibles o incurrir en una pérdida económica. Es así como nacieron la programación lineal entera, binaria y mixta.

Cuando se restringe a las variables a tomar valores enteros, se define como programación lineal entera (*Integer Programming* o IP). Cuando solamente se utilizan variables binarias, se conoce como programación binaria (*binary programming* o BP) y cuando se considera una mezcla de ambas, se denomina programación lineal entera mixta (*mixed integer programming* o MIP) (Martin, 1999).

El problema de localización de instalaciones puede ser resuelto utilizando modelos matemáticos de programación lineal entera mixta, como el desarrollado por Daskin *et al.* (2005), o el problema de localización de instalaciones capacitado extendido de Morales (2016).

2.2.2.2 MÉTODOS CUANTITATIVOS APROXIMADOS

En esta clasificación encontramos a los métodos heurísticos, metaheurísticos y de simulación (Ballou, 2004; Drezner y Hamacher, 2002) (ver Figura 2.7). Como característica general, los métodos aproximados arrojan soluciones que no garantizan alcanzar el óptimo, sin embargo, su velocidad de resolución es menor, si se comparan con los métodos exactos.

De acuerdo a Yang (2011), un método heurístico busca o descubre a prueba y error. Armas *et al.* (2017), recurrieron a ellos para dar solución al problema de localización de instalaciones no capacitado (*Uncapacitated Facility Location Problem* o UFLP), ya que utilizando el método exacto con parámetros determinísticos, a través del modelo desarrollado por Erlenkotter (1978), concluyeron que los tiempos de ejecución para largas instancias eran insostenibles. Por esta razón, desarrollaron de manera alternativa un híbrido para reducir el tiempo de respuesta, esta vez, considerando la incertidumbre de parámetros estocásticos. Como primer paso, emplearon un heurístico basado en ahorros rápidos. Posteriormente, aplicaron ILS (*Iterated Local Search*), un metaheurístico que combinaron con simulación Monte Carlo (MCS o *Monte Carlo Simulation*). Los resultados mostraron una mejora en el tiempo de respuesta y una solución cercana al óptimo.

Atta *et al.* (2018), utilizaron así mismo, métodos de aproximación para determinar la apertura de instalaciones al mínimo costo, satisfaciendo las necesidades de los clientes. Los autores crearon dos heurísticos a los que llamaron BFR determinístico (*Backward-Forward-Replacement*) y BFR aleatorio, los cuales difieren entre ellos por el tipo de resultados obtenidos de acuerdo a su entrada de información (determinística y aleatoria).

Por otro lado, Casas-Ramírez *et al.* (2018), emplearon heurísticos para resolver un problema binivel de localización de instalaciones. En él, los clientes son asignados a las instalaciones de acuerdo a su lista de preferencias. El problema se compone de:

- Nivel superior: la empresa desea ubicar instalaciones para reducir los costos de distribución.
- Nivel inferior: los clientes buscan maximizar sus preferencias al ser asignados a las instalaciones que satisfagan su demanda.

Para resolver el nivel superior del problema de Casas-Ramírez *et al.* (2018), los autores utilizan el método *Cross Entropy* (CE), definido por de Boer *et al.* (2005), como un algoritmo adaptativo que calcula probabilidades de eventos aleatorios en redes estocásticas complejas. Cada iteración de CE se segrega en los siguientes pasos:

1. Generación de datos aleatorios según las especificaciones establecidas.
2. Actualización de los parámetros aleatorios generados para obtener mejores muestras en la siguiente iteración.

Para resolver el nivel inferior, considerando su complejidad clasificada como **NP-hard**, se selecciona alguna de las siguientes opciones:

- Adaptación *greedy* basada en las preferencias de los clientes.
- Adaptación *greedy* basada en costos regresivos.
- Un método exacto (cuando es posible).

Drezner y Hamacher (2002), mencionan que los métodos *greedy heuristics*, se clasifican en *greedy-drop* y *greedy-add*. Los primeros comienzan con instalaciones en los lugares potenciales y posteriormente remueven la ubicación con menor impacto sobre la función objetivo (de ahí el nombre de *drop*). Se continúan descartando instalaciones hasta que p ubicaciones se mantienen. Algo similar, pero en sentido inverso sucede con *greedy-add*.

Otros heurísticos que se han utilizado para resolver el problema de localización de instalaciones son: el algoritmo de ramificar y acotar (*branch-and-bound*) (Bilde y Krarup, 1977), búsqueda del vecino más cercano (*local neighborhood search*) (Ghosh, 2003), heurísticos lagrangianos (Beltran-Royo *et al.*, 2010; Atta *et al.*, 2018), etc.

Las metaheurísticas por otro lado, se definen como estrategias maestras inteligentes para diseñar o mejorar los procedimientos heurísticos. Sörensen *et al.* (2018), indican que son un esquema independiente que genera algoritmos para problemas de alto nivel, que sugieren un conjunto de lineamientos o estrategias para desarrollar la optimización de los algoritmos heurísticos. Yang (2011), indica que el término «metaheurístico», fue acuñado por Fred Glover, quien a su vez las define como estrategias maestras que guían y modifican las heurísticas para producir soluciones más allá de las que normalmente se generarían en la búsqueda de la optimalidad.

Fontalvo *et al.* (2017), utilizan el metaheurístico algoritmo genético (*Genetic Algorithm* o GA) para determinar la configuración óptima de la red de distribución de una empresa, considerando los costos fijos de los centros de distribución; los costos de transporte entre éstos, las fábricas y las empresas minoristas; así como los costos de inventariar en cada instalación, incluyendo los inventarios de seguridad.

McCall (2005), define el algoritmo genético como una metaheurística inspirada en el principio de la evolución natural Darwiniano. El concepto fue utilizado por primera vez por Holland (1975). Cada GA opera en una población artificial de cromosomas, conformados por cadenas de un alfabeto finito, generalmente binario. Cada cromosoma es una solución para el problema y posee cierta idoneidad, representada por un número real que mide qué tan buena es la solución para el problema en particular. El GA realiza entre éstos, una selección de aptitud y recombina su información para crear a la siguiente generación. Durante este proceso, los cromosomas padres seleccionados producen descendientes. Esto se repite en cada iteración, lo que provoca el surgimiento de sucesivas generaciones y la elevación del nivel de idoneidad hasta alcanzar el criterio de parada establecido. De esta manera, GA arroja la mejor

solución para el problema.

Fazayeli *et al.* (2018), utilizan también GA para resolver un problema de localización mezclado con ruteo (*Location Routing Problem* o LRP). El método busca la mejor ubicación para los centros de distribución y los almacenes, mientras que, simultáneamente crea las rutas de transporte para la distribución. Se pretenden tomar 4 decisiones:

1. Determinar las rutas multimodales entre los proveedores y los centros de distribución.
2. Elegir las ubicaciones para los cambios del transporte.
3. Ubicar los centros de distribución.
4. Crear los recorridos para las entregas desde los centros de distribución hacia los minoristas.

Por otra parte, para un problema con características similares, Kechmane *et al.* (2018), utilizan un metaheurístico denominado PSO (*Particle Swarm Optimization*). PSO fue desarrollado por Kennedy and Eberhart en 1995. Está basado en el comportamiento de enjambre observado en la naturaleza, por ejemplo, en los peces y pájaros (Yang, 2011).

La misma herramienta es utilizada por Maríc (2016), pero en su caso, para resolver un problema de localización de instalaciones binivel no capacitado (*Bilevel Uncapacitated Facility Location Problem* o BUFLP).

Entre otras metaheurísticas que se han utilizado para resolver problemas de localización de instalaciones, se encuentran la búsqueda tabú (*Tabu Search* o TB) y *Simulated Annealing* (SA) (Kaya y Urek, 2016).

La simulación es otra opción que permite modelar la realidad de una manera acertada. Para Ballou (2004), este tipo de metodología prefiere una solución

subóptima de un problema descrito con precisión óptima, que una solución óptima para una descripción del problema aproximada. La simulación permite jugar con diversos escenarios, detectar comportamientos y analizar tendencias en tiempos computacionalmente razonables.

Persson *et al.* (2013), establecen que la simulación es utilizada generalmente para verificar la factibilidad de una solución óptima una vez que ésta ha sido encontrada. Las pruebas de simulación son ejecutadas bajo circunstancias dinámicas, introduciendo comportamientos estocásticos. Los autores resuelven un problema de localización de instalaciones con un modelo de simulación combinado con un algoritmo de optimización. Se logra resolver el problema casi con la misma exactitud que un modelo de optimización.

Existen muchos ejemplos sobre la aplicación de métodos aproximados para solucionar el problema de localización de instalaciones. Las características del problema y la complejidad del mismo, determinan cuál es la herramienta ideal para ser utilizada.

2.2.2.3 PROBLEMA DE LA LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES NO CAPACITADO

El problema de localización de instalaciones no capacitado pretende encontrar la ubicación de las instalaciones, el patrón de envío entre ellas y los clientes para minimizar los costos por el uso de las instalaciones potenciales, y el envío de los productos, sujeto a la satisfacción de las demandas de los clientes.

Los supuestos son:

- Se conocen las ubicaciones de los clientes.
- Se conoce la demanda de cada cliente.
- La capacidad de cada instalación es ilimitada.

- Si una ubicación es seleccionada, se incurrirá en un costo fijo.
- Se conoce el costo del transporte de cada ubicación hacia cada cliente.

Tomando como base el método exacto, el problema de localización de instalaciones no capacitado se expresa de la siguiente manera:

Conjuntos

I : Conjunto de ubicaciones de los clientes $i \in I$.

J : Conjunto de ubicaciones potenciales $j \in J$.

Parámetros

h_i : Demanda del cliente $i \in I$.

f_j : Costo fijo de ubicar una instalación en la ubicación potencial $j \in J$.

c_{ij} : Costo unitario de transporte entre la ubicación potencial $j \in J$ y la ubicación del cliente $i \in I$.

Variables

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{si se ubica la instalación potencial } j \in J. \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

y_{ij} = Fracción de la demanda en la ubicación del cliente $i \in I$ que es servido por la ubicación $j \in J$.

$$z = \min \quad \sum_{j \in J} f_j x_j + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} h_i c_{ij} y_{ij} \quad (2.1)$$

$$s.a : \quad \sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.2)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I; \forall j \in J \quad (2.3)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (2.4)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I; \forall j \in J \quad (2.5)$$

La función objetivo (2.1), busca minimizar los costos de transporte y los costos fijos de las instalaciones potenciales a través de una variable binaria que determina si la ubicación se utiliza o no. Las restricciones de este problema requieren que la demanda de cada cliente sea satisfecha (2.2) y que se abra la ubicación si es asignada (2.3). Las restricciones (2.4) y (2.5) determinan la naturaleza de las variables.

El modelo considera que las instalaciones tienen una capacidad ilimitada. El beneficio es que la demanda de cada cliente podría ser satisfecha solamente por un solo centro de distribución. De acuerdo a Daskin *et al.* (2005), muchas firmas prefieren contar con una solución que considere una sola fuente de abastecimiento, ya que esto simplifica la gestión de la cadena de suministro.

2.2.2.4 PROBLEMA DE LA LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES CAPACITADO

Es una variante del problema de localización de instalaciones no capacitado. La diferencia consiste, precisamente, en que se le agrega a las restricciones del modelo mostrado de las ecuaciones (2.1) a (2.5) la capacidad b de las instalaciones potenciales. Solamente agregando la restricción (2.6), que limita la asignación de la demanda de los clientes a la capacidad de cada centro de distribución, se logra transformar el problema de no capacitado a capacitado.

$$\sum_{i \in I} h_i y_{ij} - b_j x_j \leq 0 \quad \forall j \in J \quad (2.6)$$

Desde la perspectiva empresarial, la capacidad de las instalaciones es un supuesto que en la vida real participa activamente. Por esta razón, la satisfacción de la

demanda queda supeditada seguramente a la cobertura de más de una instalación. La complejidad de la gestión de la cadena de suministro aumenta, sin embargo, este modelo guarda una relación más estrecha con las condiciones reales de las redes de distribución de las empresas.

2.2.2.5 PROBLEMA DE LA LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES

CAPACITADO EXTENDIDO

Una variante del problema de localización de instalaciones capacitado es la versión extendida, desarrollada por Geoffrion y Graves (1974). Además de considerar la capacidad, es un modelo multietapas y multiproductos.

El problema de localización multietapas (o de etapas múltiples) se presenta cuando la mercancía toca puntos intermedios durante su trayectoria antes de llegar a su destino final. La materia prima llega a algún depósito de manera temporal, antes de ser entregada al cliente (Hekmatfar y Farahani, 2009). Ejemplos de estaciones o depósitos intermedios son puertos, centros de distribución, centros de consolidación y la fábrica. En la Figura 2.6, se observan las cuatro etapas de un problema de localización de instalaciones: la etapa uno comprende desde las instalaciones de los proveedores hacia los centros de consolidación, la etapa dos se compone de los movimientos realizados entre los centros de consolidación y los puertos de salida, la etapa tres contempla el transporte desde los puertos de origen hasta los de destino y finalmente, la etapa cuatro traslada la mercancía desde el puerto de origen hasta su destino final que es la fábrica.

El problema de localización multiproducto, de acuerdo a Klose y Drexler (2003), surge cuando se manejan artículos con diferentes características que impactan la capacidad de producción, depósito y transbordo entre nodos. Existen diversos tipos de productos, cuya variabilidad respecto a sus características específicas como peso y dimensiones, inciden directamente sobre el planteamiento del modelo para la solución

del problema. En la Figura 2.6, se observan diferentes tipos de artículos manejados por cada proveedor, los cuales, poseen rasgos intrínsecos que deben ser considerados en la modelación.

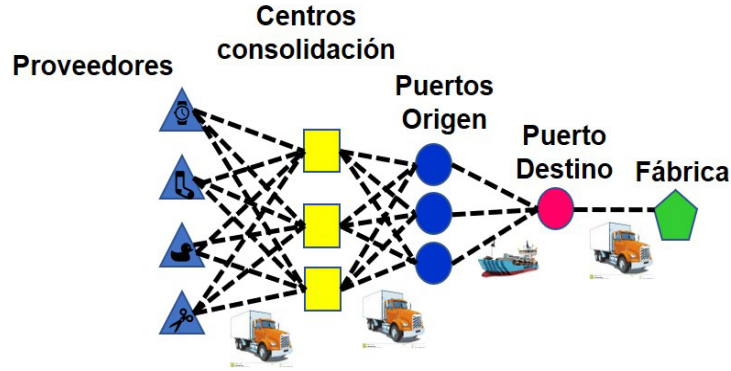


Figura 2.6: Representación de un problema multietapas y multiproductos.

El modelo desarrollado por Geoffrion y Graves (1974), incluye los embarques de diferentes tipos de productos desde las plantas productivas hasta los clientes, pasando por depósitos intermedios. Las demandas de los clientes son satisfechas y se cumple con la capacidad de cada centro de distribución.

Para poder representar la ampliación propuesta por Geoffrion y Graves (1974), al modelo de localización de instalaciones no capacitado de la ecuación (2.1) a (2.5), se le agrega los siguientes parámetros y variables de decisión:

Conjuntos

K : Conjunto de ubicaciones de fábricas $k \in K$.

L : Conjunto de productos $l \in L$.

Parámetros

d_{li} : Demanda del producto $l \in L$ del cliente $i \in I$.

s_{lk} : Oferta del producto $l \in L$ en la fábrica $k \in K$.

$\underline{v}_j, \bar{v}_j$: Producción anual mínima y máxima permitida en la ubicación potencial $j \in J$.

v_j : Variable del costo unitario de producción en la ubicación potencial $j \in J$.

c_{lkji} : Costo unitario de producir y transportar el producto $l \in L$ entre la planta $k \in K$, la ubicación potencial $j \in J$ y la ubicación del cliente $i \in I$.

Variables

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la demanda del cliente } i \in I \text{ es servida por la instalación potencial } j \in J. \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

El modelo sugerido por Geoffrion y Graves (1974) se muestra a continuación:

$$z = \min \quad \sum_{j \in J} f_j x_j + \sum_{j \in J} v_j \left(\sum_{l \in L} \sum_{i \in I} d_{li} y_{ij} \right) + \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{lkji} z_{lkji} \quad (2.7)$$

$$s.a : \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{lkji} \leq s_{lk} \quad \forall l \in L; \forall k \in K \quad (2.8)$$

$$\sum_{k \in K} z_{lkji} = d_{li} y_{ij} \quad \forall l \in L; \forall j \in J; \forall i \in I \quad (2.9)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.10)$$

$$\underline{v}_j x_j \leq \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} d_{li} y_{ij} \leq \bar{v}_j x_j \quad \forall j \in J \quad (2.11)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (2.12)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I; \forall j \in J \quad (2.13)$$

$$z_{lkji} \geq 0 \quad \forall i \in I; \forall j \in J; \forall k \in K; \quad (2.14)$$

La función objetivo (2.7), busca la minimización de los costos fijos de las instalaciones potenciales, así como la de los costos variables de la asignación de la demanda de las instalaciones a los clientes y los costos de transporte de la planta al centro de distribución y hacia los clientes. La restricción (2.8), asegura que la cantidad total enviada del producto k no exceda la capacidad de la planta para producir tal artículo. La restricción (2.9), indica que el total del producto $k \in K$ transportado al cliente $i \in I$ a través de la instalación potencial $j \in J$, debe ser igual al total fabricado de cada producto en todas las plantas. La restricción (2.10), es de asignación

e impide que cada cliente $i \in I$ sea servido por más de una instalación potencial $j \in J$. La restricción (2.11), establece el límite máximo y mínimo de producción en cada centro de distribución $j \in J$ que sea utilizado. El conjunto de restricciones (2.12), (2.13) y (2.14), son las de estado.

2.2.2.6 PROBLEMA DE LA LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES APLICADO A UN CASO DE ESTUDIO

La estructura y forma (función objetivo, restricciones y variables) de los modelos desarrollados para resolver el problema de localización de instalaciones se determinan para cada problema en particular. No existe un modelo general de localización de instalaciones que pueda ser aplicado a todos los diversos tipos de problemas existentes (Drezner y Hamacher, 2002).

El modelo desarrollado por Morales (2016), aborda el caso de una empresa mexicana cuya materia prima es importada desde el continente asiático, vía marítima. Sus proveedores están distribuidos en China y cada uno embarca bajo el esquema LCL. El modelo analiza el patrón de envío de los proveedores hacia la fábrica, considerando el uso de centros de consolidación de carga en embarques FCL. La herramienta define los centros de consolidación que deben ser abiertos, la asignación de los proveedores a éstos, el tipo de contenedor a utilizar y la frecuencia de los envíos que satisfaga la demanda de la fábrica. El problema se define como multiproducto, multietapas, multiperíodos y multitransporte.

Chopra y Meindl (2001), indican que las largas distancias entre proveedores y clientes requieren de soluciones alternas a las vías terrestres por cuestiones de disponibilidad y costos. Por esta razón, se requiere la combinación de medios de transporte (transporte multimodal o multitransporte). Fazayeli *et al.* (2018), señalan que la European Conference of Ministers of Transport en el 2001, definió al transporte multimodal como el movimiento de bienes en una misma unidad de carga o vehículo,

el cual, utiliza uno o más medios de transporte sin una maniobra de transformación de los bienes en sí.

Según Morales (2016), los problemas multiperíodos además de considerar las instalaciones a ubicar, agregan en qué períodos se encontrarán dichas instalaciones en uso. La intención es asegurar la cobertura de la demanda del ciclo completo, a través del tiempo.

La descripción del modelo Morales (2016), es el siguiente:

Supuestos

- Las demandas, costos, inventario inicial y seis meses de planeación son conocidos.
- La escasez no está permitida.
- Todo el material es enviado en tarimas.
- Todos los tipos de transporte, de contenedor y las instalaciones tienen capacidad limitada.
- El producto en trayecto desde los puertos en Asia a la planta en el período inicial es conocido.
- El tiempo en que tarda en llegar el producto es considerado de un mes.
- Cada producto requiere múltiples operaciones que se procesan dentro de los centros de trabajo, y se da por hecho que estas son realizadas.
- Si hubiera alguna expeditación, ésta se realiza directamente desde los proveedores hasta la planta.

Conjuntos

I :	Conjunto de proveedores en China.
J :	Conjunto de centros de consolidación en China.
K :	Conjunto de puertos en China.
L :	Conjunto de puertos en América.
M :	Conjunto del tipo de transporte en China.
N :	Conjunto del tipo de producto a enviar.
P :	Conjunto del tipo de embarque.
R :	Conjunto del tipo de transporte en América.
T :	Conjunto de períodos de tiempo.

Parámetros

c_{ijmt}^1 :	Costo por viaje del proveedor i al centro de distribución j con el transporte m en el período t .
c_{jkmt}^2 :	Costo por viaje del centro de consolidación j al puerto k con el transporte m en el período t .
c_{klpt}^3 :	Costo por viaje del puerto k al puerto l utilizando el embarque p en el período t .
c_{lrt}^4 :	Costo por viaje del puerto l a la empresa en Monterrey con el transporte r en el período t .
h_{nt} :	Costo por inventariar el producto n durante el período t .
g_{nt} :	Costo por expeditar el producto n durante el período t .
f_{jt}^1 :	Costo de abrir el centro de consolidación j en China en el período t .
f_{kt}^2 :	Costo de abrir el puerto k en China en el período t .
f_{lt}^3 :	Costo de abrir el puerto l en Norteamérica en el período t .
q_i^1 :	Capacidad de la planta i .
q_j^2 :	Capacidad de los centros de consolidación j .
q_k^3 :	Capacidad de los puertos k en China.
q_l^4 :	Capacidad de los puertos l en Norteamérica.

- b_{ijmt}^1 : Capacidad de transportar por viaje de la planta i al centro de consolidación j con el transporte m en el período t .
- b_{jkm}^2 : Capacidad de transportar por viaje del centro de consolidación j al puerto k con el transporte m en el período t .
- b_{klpt}^3 : Capacidad de transportar por viaje del puerto k al puerto l con el embarque p en el período t .
- b_{lrt}^4 : Capacidad de transportar por viaje del puerto l a la planta en Monterrey con el transporte r en el período t .
- d_{nt} : Demanda de la planta en Monterrey del producto n en el período t .
- w_n^0 : Inventario inicial del producto n .
- x_{klpn}^0 : Inventario en trayecto desde el puerto k al puerto l del producto n en el embarque p .

Variables

- x_{ijnmt}^1 : Cantidad de tarimas enviadas desde el proveedor i al centro de consolidación j en China del producto n con el transporte m en el periodo t .
- x_{jknmt}^2 : Cantidad de tarimas enviadas desde el centro de consolidación j al puerto k en China del producto n con el transporte m en el periodo t .
- x_{klpn}^3 : Cantidad de tarimas enviadas desde el puerto k al puerto l del producto n con el embarque p en el periodo t .
- x_{lnrt}^4 : Cantidad de tarimas enviadas desde el puerto l a la empresa en Monterrey del producto n con el transporte r en el periodo t .
- x_{nt}^5 : Cantidad de tarimas del producto n expeditados en el período t .
- v_{ijmt}^1 : Cantidad de viajes realizados del proveedor i al centro de consolidación j utilizando el transporte m en el período t .
- v_{jkm}^2 : Cantidad de viajes realizados del centro de consolidación j al puerto k utilizando el transporte m en el período t .
- v_{klpt}^3 : Cantidad de viajes realizados del puerto k al puerto l utilizando el embarque p en el período t .

- v_{lrt}^4 : Cantidad de viajes realizados del puerto l a la empresa en Monterrey utilizando el transporte r en el período t .
- w_{nt} : Cantidad de tarimas del producto n a inventariar en Monterrey durante el período t .
- y_{jt}^1 : Binaria: 1 si se decide abrir el centro de consolidación j en el período t y 0 en caso contrario.
- y_{kt}^2 : Binaria: 1 si se decide abrir el puerto k en China en el período t y 0 en caso contrario.
- y_{lt}^3 : Binaria: 1 si se decide abrir el puerto l en China en el período t y 0 en caso contrario.
- u_{ijt} : Binaria: 1 si se decide abastecer el centro de consolidación j desde la planta i en el período t y 0 en caso contrario.

Modelación del problema

Dada la notación anterior, el modelo queda formulado como el siguiente programa lineal entero mixto (Morales, 2016):

$$\begin{aligned}
Z = \min \quad & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} c_{ijmt}^1 v_{ijmt}^1 + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} f_{jt}^1 y_{jt}^1 \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} c_{jkm t}^2 v_{jkm t}^2 + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} f_{kt}^2 y_{kt}^2 + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} c_{klpt}^3 v_{klpt}^3 \\
& + \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} f_{lt}^3 y_{lt}^3 + \sum_{l \in L} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} c_{lrt}^4 v_{lrt}^4 + \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} h_{nt} w_{nt} + \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} g_{nt} x_{nt}^5
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\text{s.a: } \sum_{l \in L} \sum_{r \in R} x_{lnrt}^4 + x_{nt}^5 + w_{n,t-1} = d_{nt} + w_{nt} \quad \forall n, t \tag{2.16}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{ijnmt}^1 \leq q_{in}^1 \quad \forall i, n \tag{2.17}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} x_{jknmt}^2 \leq q_j^2 \quad \forall j \tag{2.18}$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} x_{klnpt}^3 \leq q_k^3 \quad \forall k \quad (2.19)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{lnrt}^4 \leq q_l^4 \quad \forall l \quad (2.20)$$

$$x_{ijnmt}^1 \leq My_{jt}^1 \quad \forall i, j, n, m, t \quad (2.21)$$

$$x_{jknmt}^2 \leq My_{kt}^2 \quad \forall j, k, n, m, t \quad (2.22)$$

$$x_{klnp,t-1}^3 \leq My_{lt}^3 \quad \forall k, l, n, p, t \quad (2.23)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijnmt}^1 = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} x_{jknmt}^2 \quad \forall j, n, t \quad (2.24)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{jknmt}^2 = \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} x_{klnp,t}^3 \quad \forall k, n, t \quad (2.25)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} x_{klnp,t-1}^3 = \sum_{r \in R} x_{lnrt}^4 \quad \forall l, n, t \quad (2.26)$$

$$b_{ijmt}^1 v_{ijmt}^1 \geq \sum_{n \in N} x_{ijnmt}^1 \quad \forall i, j, m, t \quad (2.27)$$

$$b_{jkm,t}^2 v_{jkm,t}^2 \geq \sum_{n \in N} x_{jknmt}^2 \quad \forall j, k, m, t \quad (2.28)$$

$$b_{klp,t}^3 v_{klp,t}^3 \geq \sum_{n \in N} x_{klnp,t}^3 \quad \forall k, l, p, t \quad (2.29)$$

$$b_{l,r,t}^4 v_{l,r,t}^4 \geq \sum_{n \in N} x_{lnrt}^4 \quad \forall l, r, t \quad (2.30)$$

$$\sum_{j \in J} u_{ijt} \leq 1 \quad \forall i, t \quad (2.31)$$

$$x_{ijnmt}^1 \leq Mu_{ijt} \quad \forall i, j, n, m, t \quad (2.32)$$

$$v_{ijmt}^1, v_{jkm,t}^2, v_{klp,t}^3, v_{l,r,t}^4, w_{nt} \in \mathbb{Z}^+ \quad (2.33)$$

$$y_{jt}^1, y_{kt}^2, y_{lt}^3, u_{ijt} \in \{0, 1\} \quad (2.34)$$

$$x_{ijnmt}^1, x_{jknmt}^2, x_{klnp,t}^3, x_{lnrt}^4, x_{nt}^5 \geq 0 \quad (2.35)$$

La función objetivo (2.15), minimiza los costos totales de transporte variables y fijos de la materia prima en cada uno de las etapas: desde las ubicaciones de los proveedores hacia los centros de consolidación, desde los centros de consolidación hacia los puertos asiáticos de salida, posteriormente, desde estos puntos hacia los puertos en América y finalmente, la entrega en la planta productiva. Los costos fijos, atañen

a los centros de consolidación y los puertos en Asia y América. Además, considera los costos de mantener el inventario en la planta en Monterrey y las expeditaciones hacia la fábrica.

La restricción (2.16), contribuye a la satisfacción de la demanda y calcula la cantidad a inventariar de cada producto. Las restricciones (2.17-2.20), aseguran que la capacidad de cada instalación no sea sobrepasada por la cantidad de *pallets* requeridos. Las restricciones (2.21), (2.22) y (2.23) corroboran que si existe un movimiento de *pallets* las instalaciones sea activadas. Las restricciones (2.24), (2.25) y (2.26), certifican el flujo de *pallets* entre cada etapa. Las restricciones (2.27-2.30), calculan el total de viajes necesarios de acuerdo a la capacidad de los camiones. El grupo de restricciones (2.31) y (2.32) confirman que los proveedores abastezcan a uno y sólo un centro de consolidación. Finalmente, las restricciones (2.33), (2.34) y (2.35), son restricciones lógicas.

La gran M es un número positivo lo suficientemente grande que garantiza que ninguna solución factible sea eliminada.

Cuando se pretende dar solución a una problemática real cuyo planteamiento guarda cierta similitud con trabajos previos, en el proceso de selección de la herramienta se deben de considerar ciertas características como el grado de semejanza con respecto a la realidad que se modela, el tiempo computacional de ejecución y el tipo de resultados obtenidos.

Para el caso de estudio de «Minimización de costos de transporte Europa-Monterrey», se ha elegido un método exacto que se aplicará a través de un modelo matemático de programación lineal entera mixta. Con los resultados y el tiempo de respuesta computacional del trabajo previo de Morales (2016), se infiere que para un problema con las características del presente trabajo de tesis, el uso de una herramienta similar arrojaría resultados lógicos en un tiempo razonable, que pudieran guardar congruencia con su aplicación operativa.

La gama de herramientas para resolver el problema de localización de instala-

ciones es amplia (ver Figura 2.7). Los métodos cualitativos y cuantitativos pueden combinarse para asegurar la obtención de una solución integral. La elección del método y el modelo adecuados, son relativos al problema.

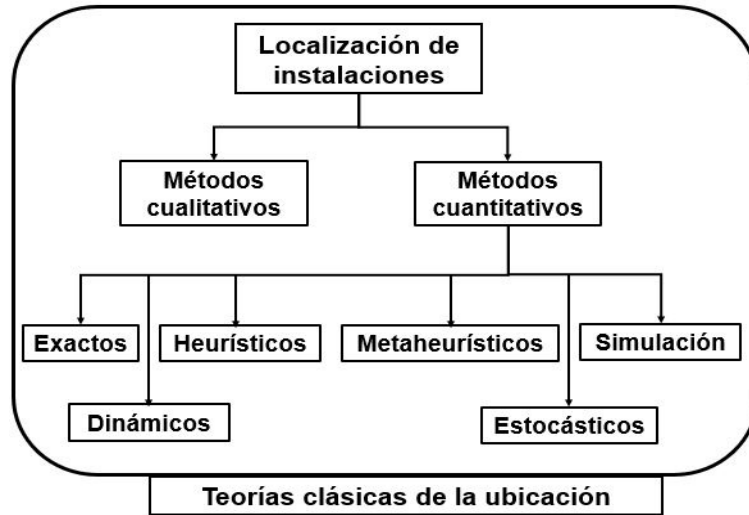


Figura 2.7: Métodos de solución del problema de localización de instalaciones.

Fuente: Elaboración propia basada en la información de los autores mencionados en la tabla 2.2.

2.3 PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA COMO HERRAMIENTA DE SOLUCIÓN PROPUESTA

En la Tabla 2.2, se observa un análisis sobre los diversos modelos utilizados por diferentes autores para la resolución del problema de localización de instalaciones. Para darle solución al presente caso de estudio, se ha seleccionado como método exacto, la aplicación de un modelo de programación lineal entera mixta. La metodología buscará la minimización de los costos de transporte a través del establecimiento de los patrones de envío de los proveedores hacia la fábrica, determinando qué centros de consolidación contribuyen al objetivo de la minimización de costos.

En la empresa en cuestión, existe el antecedente de un proyecto similar: se implementó un centro de consolidación en China con la intención de reunir la carga

proveniente del continente asiático, reduciendo los costos totales de transporte y simplificando las maniobras operativas y administrativas durante los procesos de importación. La herramienta utilizada para la toma de la decisión se desconoce.

Como resultados esperados, se pretende que, a través del uso de una herramienta científica se mejore la toma de decisiones de alto impacto empresarial, rediseñando la red de abastecimiento de los proveedores hacia la fábrica con la incorporación en su cadena de suministro de instalaciones que consoliden la carga de los proveedores semanalmente. Así mismo, se busca fortalecer la coalición entre la academia y la experiencia profesional, en pro de la optimización y del incremento del nivel de competitividad.

Concepto	Exacto Morales (2016)	Metaheurístico Fazayeli <i>et al.</i> (2018)	Heurístico Ramírez <i>et al.</i> (2018)	Metaheurístico Fontalvo <i>et al.</i> (2017)
Denominación	CFLP	CFLP	BCFLP	FLP
Instalación	Centro de consolidación	Centro de distribución	Centro de distribución	Centro de distribución
Tipo de herramienta	MIP	Algoritmo genético	<i>Cross entropy</i> y <i>Greedy</i>	Algoritmo genético
Método	Exacto	Aproximado	Aproximado	Aproximado
Capacidad instalaciones	Capacitado	No capacitado	Capacitado	No capacitado
Capacidad vehículos	Capacitado	Capacitado	No aplica	No aplica
Linear	✓	✓	✓	No
Multi-productos	✓	✗	✗	Sí
Multi-períodos	✓	✗	✗	Sí
Multi-transporte	✓	✗	✗	No
Multi-modal	✗	✓	✗	No
Inventario	✓	✗	✗	Sí
Etapas	✓	✓	✗	Sí
Expeditaciones	✓	✗	✗	No
Ruteo	✗	✓	✗	No

Tabla 2.2: Herramientas de solución del problema de localización de instalaciones.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

El problema de localización de instalaciones ha sido resuelto a través de los años implementando diferentes metodologías y herramientas. Las decisiones subjetivas, basadas en la experiencia y conocimiento de las personas que están en contacto con la operación diaria, han jugado un papel predominante en las organizaciones para la determinación de la apertura de nuevas instalaciones. Sin embargo, el incremento en el nivel de exigencia de los consumidores, así como la intensa competencia entre cadenas de suministro, han reducido la ventana de reacción de las empresas para hacer frente a la incertidumbre de los cambios en la demanda.

Una respuesta a esta problemática, es el empleo de herramientas cuya metodología permita analizar todas las soluciones posibles del problema, encontrando entre ellas, la mejor. Con la optimización de los procesos estandarizados, es posible explotar la competitividad de las organizaciones, a través del aprovechamiento máximo de sus recursos disponibles (tiempo, dinero, personal, maquinaria, inventario, etc).

La RAE (2017), define la optimización como «*buscar la mejor manera de realizar una actividad*». La optimización de un proceso es el objetivo de la investigación de operaciones (IO).

La IO, es una rama de las Matemáticas que se aplica a la problemática relacionada con la conducción y coordinación de actividades en una organización, indepen-

dientemente de la naturaleza de la misma: su zona de influencia abarca desde manufactura, transporte y construcción, hasta telecomunicaciones, planeación financiera, cuidado de la salud, fuerza armada y servicios públicos, entre otras. La IO utiliza el método científico, aplicado a nivel operativo (Hillier y Lieberman, 2010). Hace uso de modelos matemáticos y algoritmos, con el objetivo de ser utilizados como apoyo en la toma de decisiones organizacionales.

Según Hillier y Lieberman (2010), la IO es empleada para resolver conflictos entre las áreas de la organización, de manera tal, que el resultado sea el mejor para ésta en su conjunto y no para un proceso aislado en particular, a manera de silo. Las metas que se persiguen deben ser congruentes con los objetivos globales de la empresa. En lugar de conformarse con mejorar el estado de las cosas, el fin último de la IO es identificar el mejor curso de acción posible.

Cuando se pretende resolver un problema a través de IO, se recomienda seguir una serie de pasos específicos que permiten alcanzar el objetivo de la pesquisa (ver Figura 3.1).

En la primera etapa se requiere definir el problema. De su correcta definición y comprensión, se derivará el resto de la metodología. Ante una definición del problema inconsistente, se obtendrán resultados erróneos que no atacarán el problema real.

En la etapa dos, se formula matemáticamente el problema definido en la etapa previa. La representación apegada a la realidad, contemplando los supuestos adecuados del caso de estudio es esencial.

En la tercera etapa, como consecuencia de la exploración de la IO de cada una de las posibles soluciones del problema, el procesamiento de datos y el análisis de patrones u opciones, por lo general es complejo. Por esta razón, es necesario que el modelo matemático desarrollado sea resuelto con la ayuda de *software* especializado que permita reducir el margen de error por factor humano, así como la mejora del tiempo de respuesta. En algunas ocasiones, incluso con el apoyo de herramientas tecnológicas, existen problemas cuyo nivel de complejidad impide que sean resueltos

en tiempo satisfactorio, computacionalmente hablando.

Durante la cuarta etapa de IO, se prueba y valida que el modelo diseñado arroje valores lógicos en la herramienta computacional utilizada a través de la experimentación. Los resultados de ésta ayudan a realizar los ajustes necesarios al modelo y contribuyen a medir su alcance respecto a la cantidad de restricciones que puede manejar y su tiempo de solución.

En la etapa número cinco, cuando el modelo ha arrojado una solución factible (ya sea la mejor solución o una cercana a ésta), se evalúa qué cambios operativos y administrativos conllevan los resultados obtenidos. Es en esta etapa, donde se deben interpretar los resultados matemáticos para identificar de qué manera podrán ser aplicados a la operación impactada.

Finalmente, en la sexta etapa de IO, todos los involucrados en el proceso a mejorar han sido informados y entrenados, y se procede con la implementación de los cambios sugeridos por la herramienta matemática.

Los estudios prácticos de IO no se limitan a ser ejercicios matemáticos. Con frecuencia, el análisis matemático sólo representa una pequeña parte del trabajo. Para completar el flujo de IO se requiere la materialización de los datos duros obtenidos en la operación.

Es por este motivo que, habiendo revisado la literatura respecto a problemas de localización de instalaciones similares y una vez que se evaluaron las opciones disponibles, se determinó que, dadas las características del problema, los recursos a la mano y los resultados esperados, la mejor herramienta de solución es la aplicación de un modelo de programación lineal entera mixta. Su corte científico y su flexibilidad de representación de la realidad, erradican la subjetividad que suele prevalecer en las decisiones empresariales y conforman un híbrido entre el método científico y el funcionamiento de la cadena de suministro, que arroja resultados matemáticos viables que sirven de apoyo para la toma de decisiones estratégicas y tácticas de la empresa.

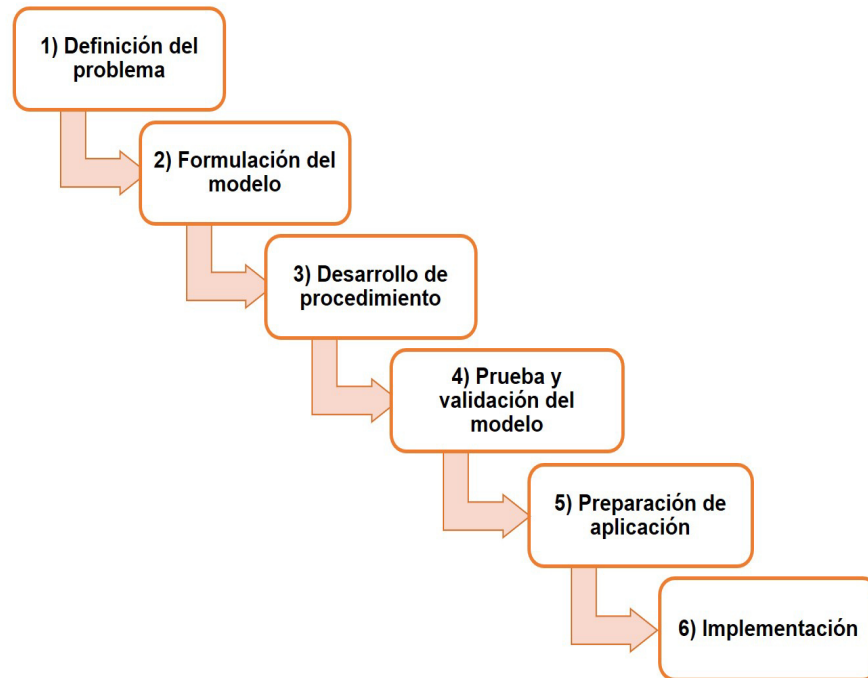


Figura 3.1: Etapas de la IO.

Fuente: creación propia basada en la información de Hillier y Lieberman (2010).

3.1 CANDIDATOS A REPLICAR EL MODELO PROPUESTO

El abastecimiento de suministros desde el exterior es un importante eslabón de la cadena de suministro de muchas empresas. Su diseño debe incluir el cumplimiento de los estándares de calidad definidos por la organización, procurando el máximo aprovechamiento de los recursos disponibles para minimizar su impacto en los costos del producto final ofrecido al cliente. El modelo de programación lineal entera mixta presentado en esta sección, persigue la sinergia entre el campo científico y el operativo para optimizar dicho eslabón.

Una de las ventajas de la IO es que la representación abstracta de la realidad que se crea gracias a la modelación, permite ajustar los modelos existentes y utili-

zarlos como base para que otras entidades con problemas similares puedan partir de una base firme. Los supuestos de los problemas representan los lineamientos bajo los cuales el modelo desarrollado es aplicable.

Las características o supuestos básicos a considerar por otras entidades que deseen utilizar el modelo aplicado al caso de estudio de «Minimización de costos de transporte Europa-Monterrey», son:

- Existencia de varios proveedores participantes de la cadena de abastecimiento.
- Preponderancia de embarques bajo el esquema LCL.
- Largos tiempos de entrega en planta por desconsolidaciones de carga en puerto.
- Espacios disponibles en su almacén físico para resguardar mercancía con tiempos tránsito prolongados.
- Gastos administrativos elevados por el procesamiento de embarques LCL.

3.2 ESTRUCTURA BÁSICA DE LOS MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL

El término «programación lineal» acuñada por Dantzig (1963), guarda una connotación militar, más que computacional, como podría creerse. «Programación» es utilizado por los militares para describir un plan o proponer una solución para el despliegue y solución de problemas logísticos. Dicho término se quedó arraigado como la forma genérica de referirse a la optimización lineal de un problema (Martin, 1999).

Los componentes básicos de un modelo de programación lineal se describen a continuación: A es una matriz de números racionales $m \times n$, c es una columna vector

de componente racional n y b una columna vector de componente racional m . La ecuación (3.1) es la *función objetivo*. En LP, esta función objetivo es minimizada sujeto a la restricción (3.2). La restricción (3.3), representa las restricciones no negativas. Las variables en el problema x se conocen como *variables de decisión*. El vector b en la restricción (3.2) es conocido como *el lado derecho*.

La estructura de un problema de programación lineal básico se observa de los numerales (3.1) a (3.3):

$$z = \text{mín} \quad c^T x \quad (3.1)$$

$$\text{s.a:} \quad Ax = b \quad (3.2)$$

$$x \geq 0 \quad (3.3)$$

Tan pronto como los modelos de programación lineal comenzaron a utilizarse para resolver problemas de manera habitual, los científicos se percataron de que muchas veces, redondear valores fraccionados al número entero más cercano, resultaba en una pérdida de exactitud en el resultado. También se dieron cuenta de que en algunas ocasiones, debían decidir entre invertir en un proyecto o no, abrir un almacén o no. Es así como surgió la estructura de la programación lineal entera mixta, que combina variables de decisión enteras y binarias (3.4-3.7).

$$z = \text{mín} \quad c^T x_j \quad (3.4)$$

$$\text{s.a:} \quad Ax_j = b \quad (3.5)$$

$$x_j \geq 0 \quad (3.6)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}^+ \quad (3.7)$$

3.2.1 FUNCIÓN OBJETIVO DEL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES EN MIP

La función objetivo del modelo general del problema de localización de instalaciones de la empresa, cuenta con dos componentes básicos de costos en su estructura: fijos y variables.

El objetivo del problema de localización de instalaciones es encontrar la ubicación más apropiada que logre satisfacer las demandas de los clientes al mínimo costo fijo y variable (Morales, 2016). Por esta razón, ambos tipos de costos conviven en la función objetivo (3.8). Los costos fijos se generan si se desean utilizar las ubicaciones potenciales, mientras que los costos variables están relacionados con el transporte de la mercancía entre las diferentes ubicaciones de los proveedores hacia las instalaciones potenciales.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} f_i z_i \quad (3.8)$$

3.3 MODELO DE CASO DE ESTUDIO «MINIMIZACIÓN DE COSTOS DE TRANSPORTE EUROPA-MONTERREY»

La empresa cuenta con una cadena de abastecimiento en la cual, los proveedores europeos embarcan la materia prima por medio de cargas LCL. Bajo la premisa de que un *pallet* LCL es más económico que uno enviado como FCL, se pretende minimizar los costos totales de transporte de Europa hacia Monterrey, habilitando centros de consolidación para aglomerar la carga de los proveedores europeos y enviarla hacia la fábrica, considerando la capacidad de las instalaciones, las demandas de la fábrica en cada período y el nivel de inventarios en planta. Como resultado,

se espera encontrar el patrón de envío entre las diversas etapas e instalaciones que minimice los costos totales.

3.3.1 NOTACIÓN DEL MODELO

Supuestos

- Los tipos de producto son conocidos y finitos.
- La ubicación de cada proveedor europeo es discreta.
- La ubicación de las instalaciones potenciales en Europa y su respectivo costo fijo son conocidos.
- Se conoce la demanda de la fábrica de cada producto en cada período.
- Las dimensiones y peso los tipos de *pallet* son conocidos.
- Los costos de transporte de cada etapa entre cada instalación son conocidos.
- El inventario inicial e inventario en tránsito de en la planta de Monterrey es cero.
- Se considera un horizonte de planeación de doce meses.
- La escasez no está permitida.
- La capacidad de cada instalación es limitada y conocida.
- La fábrica dispone de una cantidad finita de localidades de almacenamiento de materia prima.
- Se conoce la capacidad de los tipos de transporte.
- Los envíos entre cada etapa se asignan a una sola instalación, es decir, el embarque de un producto no puede ser repartida en más una instalación.

- Los productos están disponibles al momento de recibir el pedido.
- El tiempo tránsito puerto a puerto es de 30 días.
- Las expeditaciones aéreas desde cada instalación de los proveedores hasta la fábrica en Monterrey están permitidas.

Conjuntos

I	Conjunto de proveedores en Europa.
J	Conjunto de centros de consolidación en Europa.
K	Conjunto de puertos en Europa.
L	Conjunto de puertos en América.
M	Conjunto de tipos de transporte en Europa.
N	Conjunto de tipos de producto a enviar.
P	Conjunto de tipos de embarque marítimo.
R	Conjunto de tipos de transporte en América.
T	Conjunto de períodos de tiempo.

Parámetros

c_{ijmt}^1 :	Costo por <i>pallet</i> del proveedor i al centro de consolidación j en el transporte m en el período t .
c_{jkm}^2 :	Costo por <i>pallet</i> del centro de consolidación j al puerto k en el transporte m en el período t .
c_{klpt}^3 :	Costo por <i>pallet</i> del puerto k al puerto l utilizando el tipo de embarque marítimo p en el período t .
c_{lrt}^4 :	Costo por <i>pallet</i> del puerto l a la empresa en Monterrey utilizando el transporte r en el período t .
h_{nt} :	Costo por inventariar el producto n durante el período t .
g_{nt} :	Costo por expeditar el producto n durante el período t .

- f_{jt}^1 : Costo de abrir el centro de consolidación j en Europa en el período t .
 f_{kt}^2 : Costo de abrir el puerto k en Europa en el período t .
 f_{lt}^3 : Costo de abrir el puerto l en América en el período t .
 q_i^1 : Capacidad de la planta del proveedor i en Europa.
 q_j^2 : Capacidad de los centros de consolidación potenciales j .
 q_k^3 : Capacidad de los puertos k en Europa.
 q_l^4 : Capacidad de los puertos l en América.
 q^5 : Capacidad para inventariar de la fábrica.
 b_{ijmt}^1 : Capacidad de transportar por viaje de la planta i al centro de consolidación j con el transporte m en el período t .
 b_{jkm}^2 : Capacidad de transportar por viaje del centro de consolidación j al puerto k en Europa con el transporte m en el período t .
 b_{klpt}^3 : Capacidad de transportar por viaje del puerto k en Europa al puerto l en América con el tipo de embarque marítimo p en el período t .
 b_{lrt}^4 : Capacidad de transportar por viaje del puerto l en América a la planta en Monterrey con el transporte r en el período t .
 d_{nt} : Demanda de la planta en Monterrey del producto n en el período t .
 w_n^0 : Inventario inicial del producto n en la planta en Monterrey.
 x_{klnp}^0 : Inventario en tránsito desde el puerto k en Europa al puerto l en América del producto n en el tipo de embarque marítimo p .

Variabes

- x_{ijnmt}^1 : Cantidad de *pallets* enviados desde el proveedor i al centro de consolidación j en Europa del producto n con el transporte m en el período t .
 x_{jknmt}^2 : Cantidad de *pallets* enviados desde el centro de consolidación j al puerto k en Europa del producto n con el transporte m en el período t .
 x_{klnp}^3 : Cantidad de *pallets* enviados desde el puerto k en Europa al puerto l en América del producto n con el tipo de embarque marítimo p en el período t .

- x_{lnrt}^4 : Cantidad de *pallets* enviados desde el puerto l en América a la empresa en Monterrey del producto n con el transporte r en el período t .
- x_{nt}^5 : Cantidad de *pallets* expeditados a la planta en Monterrey del producto n en el período t .
- v_{ijmt}^1 : Cantidad de viajes realizados del proveedor i al centro de consolidación j utilizando el transporte m en el período t .
- v_{jkm}^2 : Cantidad de viajes realizados del centro de consolidación j al puerto k en Europa utilizando el transporte m en el período t .
- v_{klpt}^3 : Cantidad de viajes realizados del puerto k en Europa al puerto l en América utilizando el tipo de embarque marítimo p en el período t .
- v_{lrt}^4 : Cantidad de viajes realizados del puerto en América l a la empresa en Monterrey utilizando el transporte r en el período t .
- w_{nt} : Cantidad de *pallets* del producto n a inventariar en Monterrey durante el período t .
- y_{jt}^1 : Binaria: que toma el valor de 1 si se abre el centro de consolidación j en Europa en el período t y 0 si no.
- y_{kt}^2 : Binaria: que toma el valor de 1 si se abre el puerto k en Europa en el período t y 0 si no.
- y_{lt}^3 : Binaria: que toma el valor de 1 si se abre el puerto l en América en el período t y 0 si no.
- u_{ijt}^1 : Binaria: que toma el valor de 1 si el centro de consolidación j es abastecido desde la planta i en el período t y 0 si no.
- u_{jkt}^2 : Binaria: que toma el valor de 1 si el puerto k en Europa es abastecido desde el centro de consolidación j en el período t y 0 si no.

Modelación del problema

La modelación de «Minimización de costos de transporte Europa-Monterrey» es la siguiente:

$$\begin{aligned}
Z = \min & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} c_{ijmt}^1 v_{ijmt}^1 + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} f_{jt}^1 y_{jt}^1 \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} c_{jkm}^2 v_{jkm}^2 + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} f_{kt}^2 y_{kt}^2 + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} c_{klpt}^3 v_{klpt}^3 \\
& + \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} f_{lt}^3 y_{lt}^3 + \sum_{l \in L} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} c_{lrt}^4 v_{lrt}^4 + \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} h_{nt} w_{nt} + \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} g_{nt} x_{nt}^5
\end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\text{s.a: } \sum_{l \in L} \sum_{r \in R} x_{lnrt}^4 + x_{nt}^5 + w_{n,t-1} = d_{nt} + w_{nt} \quad \forall n, t \tag{3.10}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{ijnmt}^1 \leq q_{in}^1 \quad \forall i, n \tag{3.11}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} x_{jknmt}^2 \leq q_j^2 \quad \forall j \tag{3.12}$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} x_{kl npt}^3 \leq q_k^3 \quad \forall k \tag{3.13}$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{lnrt}^4 \leq q_l^4 \quad \forall l \tag{3.14}$$

$$x_{ijnmt}^1 \leq M y_{jt}^1 \quad \forall i, j, n, m, t \tag{3.15}$$

$$x_{jknmt}^2 \leq M y_{kt}^2 \quad \forall j, k, n, m, t \tag{3.16}$$

$$x_{kl npt}^3 \leq M y_{lt}^3 \quad \forall k, l, n, p, t \tag{3.17}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijnmt}^1 = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} x_{jknmt}^2 \quad \forall j, n, t \tag{3.18}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{jknmt}^2 = \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} x_{kl npt}^3 \quad \forall k, n, t \tag{3.19}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} x_{kl npt}^3 = \sum_{r \in R} x_{lnrt}^4 \quad \forall l, n, t \tag{3.20}$$

$$b_{ijmt}^1 v_{ijmt}^1 \geq \sum_{n \in N} x_{ijnmt}^1 \quad \forall i, j, m, t \tag{3.21}$$

$$b_{jkm}^2 v_{jkm}^2 \geq \sum_{n \in N} x_{jknmt}^2 \quad \forall j, k, m, t \tag{3.22}$$

$$b_{klpt}^3 v_{klpt}^3 \geq \sum_{n \in N} x_{kl npt}^3 \quad \forall k, l, p, t \tag{3.23}$$

$$b_{lrt}^4 v_{lrt}^4 \geq \sum_{n \in N} x_{lnrt}^4 \quad \forall l, r, t \tag{3.24}$$

$$\sum_{j \in J} u_{ijt}^1 \leq 1 \quad \forall i, t \quad (3.25)$$

$$x_{ijnmt}^1 \leq M u_{ijt}^1 \quad \forall i, j, n, m, t \quad (3.26)$$

$$\sum_{k \in K} u_{jkt}^2 \leq 1 \quad \forall j, t \quad (3.27)$$

$$x_{jknmt}^2 \leq M u_{jkt}^2 \quad \forall j, k, n, m, t \quad (3.28)$$

$$\sum_{n \in N} w_{nt} \leq q^5 \quad \forall t \quad (3.29)$$

$$v_{ijmt}^1, v_{jkmnt}^2, v_{klpt}^3, v_{lnt}^4, w_{nt} \in \mathbb{Z}^+ \quad (3.30)$$

$$y_{jt}^1, y_{kt}^2, y_{lt}^3, u_{ijt}^1, u_{jkt}^2 \in \{0, 1\} \quad (3.31)$$

$$x_{ijnmt}^1, x_{jknmt}^2, x_{klnt}^3, x_{lnrt}^4, x_{nt}^5 \geq 0 \quad (3.32)$$

La función objetivo (3.9), busca la minimización de los costos totales, considerando los costos variables por *pallet* transportado, así como los costos fijos por la apertura de las instalaciones de cada etapa: los centros de consolidación potenciales, los puertos de origen y los puertos destino. Así mismo, contempla el costo por inventariar en la planta productiva y las expeditaciones de materia prima. La restricción (3.10), garantiza la satisfacción de la demanda de cada producto en cada período. El conjunto de restricciones (3.11-3.14), aseguran que las capacidades de cada instalación (fábricas de proveedores, centros de consolidación, puertos de origen y puertos destino) no sean sobrepasadas. Las restricciones (3.15), (3.16) y (3.17), avallan que si se transporta materia prima las instalaciones sean activadas. El conjunto de restricciones (3.18), (3.19) y (3.20), corroboran que no existan rezagos de *pallets* entre las etapas. Las restricciones (3.21-3.24), certifican que la capacidad de cada tipo de transporte no sea excedida. La restricción (3.25), asigna cada proveedor a uno y sólo un centro de consolidación, mientras que la restricción (3.26), habilita el el centro de consolidación si se transportan *pallets*. De manera similar, la restricción (3.27), establece que un centro de consolidación puede asignar carga a uno y sólo un puerto de salida y la restricción (3.28), asegura se abra el puerto si existe flujo de mercancía. La restricción (3.29), impide que el material a inventariar por período exceda la capacidad del almacén de la fábrica. Finalmente, las restricciones (3.30),

(3.31) y (3.32), son las restricciones de estado.

En las restricciones (3.15) y (3.26), el valor de M se calcula seleccionando el valor mínimo existente entre la capacidad del proveedor, el centro de consolidación o la demanda del producto n en el período t ; para el cálculo de M en las restricciones (3.16) y (3.28), se elige el mínimo número entre la capacidad del centro de consolidación, la capacidad del puerto de salida y nuevamente, la demanda del producto n en el período t . Finalmente, para definir el valor de M en la restricción (3.17), se selecciona el valor mínimo entre la capacidad de los puertos en Europa y América, así como la demanda del producto n en el período t .

3.3.2 ANÁLISIS DE COMPLEJIDAD

El modelo presentado funge como herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Dependiendo de la velocidad en la que fluyan los procesos sobre los cuales se requieren tomar decisiones, deberá ser la agilidad del modelo para otorgar resultados. Entre más variables a calcular posea y mayor cantidad de restricciones deba considerar, la complejidad para solucionar el problema será mayor y requerirá más tiempo.

La cardinalidad de los conjuntos del modelo es la siguiente:

I : Conjunto de proveedores en Euoropa	$ I = 16$
J : Conjunto de centros de consolidación en Europa	$ J = 3$
K : Conjunto de puertos en Europa	$ K = 3$
L : Conjunto de puertos en América	$ L = 1$
M : Conjunto del tipo de transporte en Europa	$ M = 1$
N : Conjunto del tipo de producto a enviar	$ N = 16$
P : Conjunto del tipo de embarque marítimo	$ P = 3$
R : Conjunto del tipo de transporte en América	$ R = 1$
T : Conjunto de períodos de tiempo	$ T = 52$

Restricción	Cálculo	Total
(3.10)	$ N T $	832
(3.11)	$ I N $	256
(3.12)	$ J $	3
(3.13)	$ K $	3
(3.14)	$ L $	1
(3.15)	$ I J N M T $	39,936
(3.16)	$ J K N M T $	7,488
(3.17)	$ K L N P T $	7,488
(3.18)	$ J N T $	2,496
(3.19)	$ K N T $	2,496
(3.20)	$ L N T $	832
(3.21)	$ I J M T $	2,496
(3.22)	$ J K M T $	468
(3.23)	$ K L P T $	468
(3.24)	$ L R T $	52
(3.25)	$ I T $	832
(3.26)	$ I J N M T $	39,936
(3.27)	$ J T $	156
(3.28)	$ J K N M T $	7,488
	Total restricciones a considerar	113,727
(3.30)	$ I J M T + J K M T + K L P T + L R T + N T $	4,316
(3.31)	$ T + K T + L T + I J T + J K T $	3,328
(3.32)	$ I J N M T + J K N M T + K L N P T + L N R T + N T $	56,576
	Total variables a calcular	64,220

Tabla 3.1: Análisis de complejidad.

Cabe mencionar que para la experimentación se consideraron 3 escenarios, los cuales difieren cada uno de ellos respecto a la cardinalidad del conjunto de períodos de tiempo. Para efectos de reflejar el escenario más complejo, se consideró en este análisis aquel escenario con la mayor complejidad posible. Esto da como resultado una cardinalidad de 52.

El análisis de complejidad se observa en la Tabla 3.1. La multiplicación de la cardinalidad de los conjuntos de cada restricción (3.10-3.28) arroja el total de restricciones que son contempladas por el modelo. Para determinar la cantidad de variables a calcular, se suma la multiplicación de los conjuntos que intervienen en las restricciones (3.30-3.32).

Se sugiere que la frecuencia con la cual se ejecute el modelo propuesto sea semanal, con el objetivo de mejorar la reacción de la organización ante los cambios en la demanda y que esto se refleje en la colocación de las órdenes de compra.

3.4 RESULTADOS OPERATIVOS ESPERADOS

De acuerdo a las etapas de IO definidas por Hillier y Lieberman (2010), el modelo matemático MIP realizado para hacer frente al caso de estudio de la empresa es tan sólo una parte del proceso de IO. El ciclo debe contemplar el impacto que poseen sobre la cadena de suministro las decisiones tomadas con base en los resultados del modelo.

Dentro de los resultados operativos esperados con la implementación de la solución propuesta están:

1. Minimizar los costos totales de transporte de Europa a Monterrey.
2. Ofrecer a la empresa una herramienta que dé pie al análisis de los hechos y facilite la toma de decisiones a corto y largo plazo.

3. Reducir la frecuencia de los embarques LCL.
4. Disminuir el tiempo total semanal invertido por el equipo de *Import-Export* en el monitoreo y proceso de importación de las cargas LCL provenientes de Europa.
5. Reducir el tiempo tránsito del puerto de Altamira a la fábrica en Monterrey al eliminar el proceso de desconsolidación.
6. Mejorar el manejo de inventarios a través de una visualización completa de la cadena de suministro.

En un horizonte de largo plazo, se logrará determinar la activación de los centros de consolidación adecuados, minimizando los costos totales de transporte. También se facilitará el análisis y la toma de decisiones estratégicas bajo situaciones de contingencia que requieran desarrollar una alternativa a la operación regular.

En el horizonte de corto plazo, se contará con una herramienta que podrá utilizarse de manera periódica semanal para establecer los patrones de envío entre los participantes de la cadena de suministro y así, hacerle frente a los cambios en la demanda, detonados por el plan de producción de la planta.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN

La fase de experimentación se realizó utilizando la demanda de cargas LCL ejecutadas por la empresa del caso de estudio durante las 52 semanas del año 2017. Se recurrió al optimizador GAMS (*General Algebraic Modeling System*) / CPLEX. Así mismo, el equipo de cómputo seleccionado fue NEOS, un servidor gratuito por internet utilizado para resolver problemas de optimización.

Para la determinación de los centros de consolidación potenciales se consideraron como base los puertos de origen que actualmente son utilizados por la empresa de manera indistinta: Bremerhaven, Hamburgo y Amberes. Cada centro de consolidación potencial seleccionado se ubica de manera contigua a alguno de los puertos de origen.

Los costos de transporte por los distintos medios utilizados, fueron proporcionados por el proveedor de servicios logísticos de la organización. De la misma manera se obtuvieron los costos fijos por el uso de las instalaciones potenciales de los centros de consolidación, así como de las instalaciones discretas de los puertos de origen y destino. Cabe mencionar que debido a que los costos por el uso de las instalaciones son determinados por el total de contenedores movilizados por cada una de ellas, los parámetros para los costos fijos se obtuvieron calculando el número máximo de contenedores utilizados en el ciclo completo. Se destaca que todas las cotizaciones

compartidas cuentan con precios del 2018.

La capacidad de los medios de transporte se estableció considerando el tipo de medio utilizado en cada etapa. Para el transporte terrestre de las fábricas de los proveedores hacia los centros de consolidación y de éstos hacia los puertos de origen, la capacidad del vehículo terrestre se estableció en una unidad (*pallet*), debido a que se realiza el movimiento de cargas sueltas que varía entre 1 y 10 *pallets*. Para designar la capacidad del medio de transporte marítimo de puerto a puerto, se tomaron en cuenta 3 modalidades: cargas LCL (1 *pallet*), contenedor de 20 ST (20 *pallets*) y contenedor 40 ST (40 *pallets*). Para el trayecto del puerto destino de Altamira hacia la fábrica en Monterrey, se asignó una capacidad del transporte terrestre de 1 *pallet* para el movimiento de cargas LCL y de 40 *pallets*, para las cargas que resultaron consolidadas en contenedores completos.

La capacidad de los centros de consolidación se definió alineándola al uso regular actual de los puertos europeos, yendo de una mayor capacidad a una menor: Hamburgo, Bremerhaven y Amberes.

El costo por inventariar es un parámetro proporcionado por la empresa. Se asume además que no se contaba con inventario inicial ni en tránsito. Finalmente, los parámetros de demanda están representados por el total de *pallets* que efectivamente se transportaron durante el ciclo 2017 desde Europa hasta Monterrey.

4.1 LÓGICA DEL MODELO

El modelo considera el inventario en tránsito e inventario inicial o inventario *on hand* de cada producto y contempla así mismo, las expeditaciones aéreas para complementar la demanda. La formulación de la función objetivo (3.9) y la existencia de la restricción que satisface la demanda (3.10), habilitan las expeditaciones aéreas cuando el inventario inicial más el inventario *on hand* no son capaces de satisfacer la demanda de los períodos que por el tiempo tránsito marítimo, no alcanzarían a

llegar por esta vía. Para el resto de los períodos, los embarques se manejan por mar.

Otra característica importante a resaltar, es que el trayecto de la etapa 3 a la etapa 4 tarda 1 período y 4 períodos, dependiendo del escenario bajo análisis. De manera general, el tiempo que transcurre entre puerto de origen y puerto destino equivale a 30 días.

Para volver más eficiente la administración de la cadena de suministro, se impide que un proveedor que embarca un tipo de producto en un mismo período, divida su carga en más de un centro de consolidación. La misma restricción se creó para los envíos de los centros de consolidación hacia los puertos: una instalación potencial no dividirá su carga del mismo producto, en el mismo período en más de un puerto en Europa. El motivo por el cual se omite esta partición es que, a pesar de que probablemente pueda ser una opción más económica, se incrementa la complejidad operativa y administrativa. Cuando el proveedor de materia prima entrega la carga al proveedor de servicios logísticos, se emite una factura por el total de la mercancía que debe ser enviada al equipo de importaciones de la organización. Si durante su trayectoria se repartiera dicha carga entre más de un centro de consolidación, el efecto que generaría se describe en los siguientes puntos:

- Los documentos de importación se prepararon para procesar una sola carga ya que se recibió inicialmente una factura por el total de la materia prima embarcada. Esto generaría un cuello de botella en la operación ya que sería necesario refacturar para poder continuar con el procedimiento aduanero en Altamira.
- El equipo de recibos de la empresa daría entrada en sistema a la carga en parcialidades y las líneas programadas en la orden de compra estarían desalineadas.
- Existe la posibilidad de que al utilizar diferentes centros de consolidación y puertos para una carga que inicialmente pertenece a un mismo proveedor en

un mismo período, una parte de ella llegue antes que la otra, arriesgando la entrega en tiempo del material como consecuencia de alguna eventualidad en su trayectoria.

Debido a que las localidades disponibles dentro del almacén para resguardar productos europeos son limitadas, se restringe la cantidad de *pallets* a inventariar en cada período. Por esta razón, aunque pudiera resultar más económico adelantar el envío de material para consolidarlo en contenedores completos para la empresa y almacenarlos en el fábrica a la espera del llamado de la demanda, el modelo considera las localidades ofrecidas para determinar cuántos *pallets* por período pueden ser embarcados.

La descripción de los resultados generados por el modelo se explica en la Tabla 4.1.

Para cada período y cada etapa del problema, el modelo determina qué ubicaciones deben ser abiertas, cómo debe realizarse la asignación entre ellas, cuántos *pallets* se desplazarán de una ubicación a otra y cuántos viajes se requerirán para lograrlo, tomando en cuenta la capacidad de los tipos de transporte.

Para realizar la experimentación, se consideró la distribución de la demanda de 3 maneras diferentes:

1. Primer escenario (6+6): 2 ciclos de 6 períodos mensuales cada uno.
2. Segundo escenario: 12 períodos mensuales.
3. Tercer escenario: 52 períodos semanales.

A pesar de que los parámetros son los mismos para cada una de los escenarios (ajustados a la cantidad de períodos), la distribución de la demanda en períodos mensuales o semanales, arroja soluciones que difieren entre ellas.

Etapas 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Centros de consolidación a ser abiertos. ■ Asignación de proveedores a los centros de consolidación. ■ Cantidad de <i>pallets</i> a trasladar desde los proveedores hacia los centros. ■ Cantidad de viajes requeridos para desplazar el total de <i>pallets</i>.
Etapas 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Puertos de origen a ser abiertos. ■ Asignación de los centros de consolidación hacia los puertos. ■ Cantidad de <i>pallets</i> a trasladar desde los centros de consolidación hacia los puertos. ■ Cantidad de viajes requeridos para desplazar el total de <i>pallets</i>.
Etapas 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cantidad de <i>pallets</i> o contenedores a trasladar desde los puertos de origen hacia el puerto destino. ■ Cantidad de viajes requeridos para desplazar el total de <i>pallets</i> o contenedores.
Etapas 4	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cantidad de <i>pallets</i> o contenedores a trasladar desde el puerto destino hacia la fábrica. ■ Cantidad de viajes requeridos para desplazar el total de <i>pallets</i> o contenedores hacia la fábrica. ■ Cantidad de <i>pallets</i> a inventariar en la fábrica de cada producto.

Tabla 4.1: Resultados de las variables de decisión.

4.2 PRIMER ESCENARIO

Cuenta con una distribución de su horizonte de planeación de 6+6 períodos: se considera un primer ciclo de 6 meses de planeación para realizar el cálculo de los costos totales de transporte y posteriormente, se ejecuta el mismo ejercicio para el segundo ciclo que comprende los 6 meses restantes. Las órdenes de compra se colocan de manera mensual. La suma de ambos ciclos otorga el total de las 52 semanas del caso de estudio.

La razón por la cual se partió en dos ciclos, es para reflejar los cambios en la demanda que pudieran presentarse en el horizonte de planeación del segundo ciclo, el cual, incluye los 6 meses restantes del año. El impacto positivo de la estrategia es que las fluctuaciones de la demanda se ven reflejadas en el proceso de órdenes de compra durante la segunda parte del año, arrojando el patrón de envío calculado con base en un pronóstico con un menor margen de error, a diferencia de lo que se obtendría ejecutando el modelo tomando como horizonte los 12 meses del año en un solo momento.

4.2.1 CICLO 1

El patrón de envío de los primeros 6 períodos se observa en la Figura 4.1. Las fábricas de los proveedores embarcan material solamente cuando existe una demanda por satisfacer, de lo contrario, no se activan. El centro de consolidación de Bremerhaven junto con su puerto, son seleccionados en los períodos 1 y 3, mientras que el centro de distribución y puerto de Hamburgo se activan en los períodos 2, 4 y 5. Se observa una asociación entre el centro de consolidación y el puerto de la misma ciudad. Debido a que los centros de consolidación potenciales se ubican en las inmediaciones de cada puerto de origen (centro de Bremerhaven junto al puerto de Bremerhaven, centro de Hamburgo junto al puerto de Hamburgo y centro de

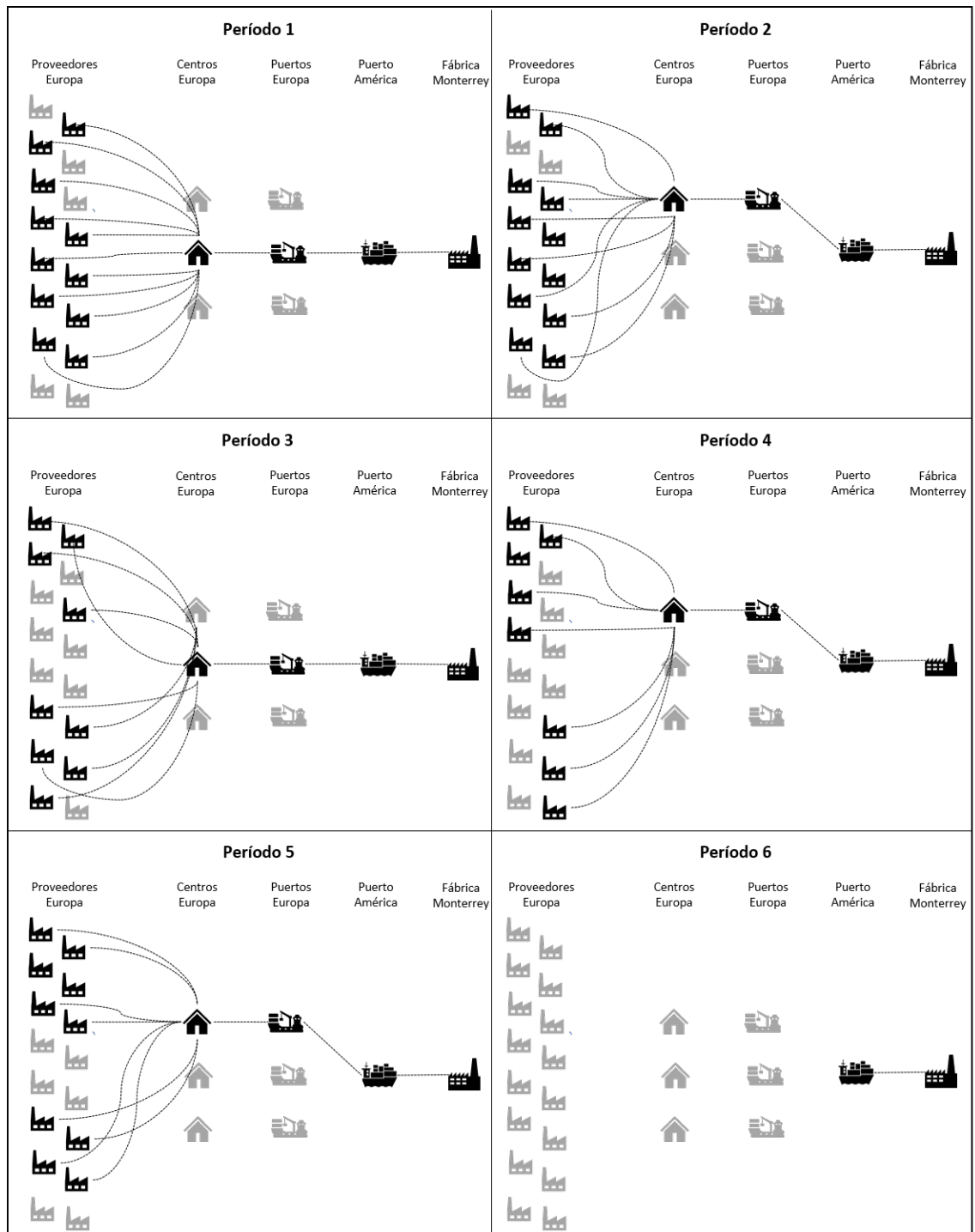


Figura 4.1: Patrón de envío con 6 periodos. Primer ciclo.

Amberes junto al puerto de Amberes), al determinar el centro de consolidación a activar, el patrón de envío contendrá a su vez el transporte desde ese centro hacia el puerto de la misma ciudad, debido a que la menor distancia entre ellos minimiza los costos de transporte por *pallet*.

Entre el puerto de origen y el puerto destino transcurre un período de diferencia: lo que se envió del puerto de origen en un período determinado, llegará a Altamira un mes después. De esta manera se representa el tiempo tránsito de puerto a puerto. Por lo tanto, en el período 6 al no existir una demanda por cubrir un período posterior, no se embarca nada, sino que simplemente se recibe lo que estaba pendiente por llegar del período anterior.

Al suponer que no se cuenta con inventario en tránsito o inventario inicial en el período cero, para cumplir con la demanda del período uno, se requiere expeditar el material vía aérea. La razón principal es que no alcanzaría a satisfacerse la demanda en tiempo si se embarcara vía marítima, dado el tiempo tránsito de puerto a puerto de un mes. En la Tabla 4.2, se contempla el total de *pallets* volados de cada producto. Nótese que no todos los productos son expeditados, ya que no tienen demanda por satisfacer. Los productos que tienen demanda a partir del período 2 son embarcados vía marítima porque se encuentran dentro del tiempo tránsito adecuado para asegurar su llegada en tiempo a la fábrica. El total de *pallets* embarcados por esta vía de los períodos 2 al 6 se observan en la Tabla 4.3.

Producto	<i>Pallets</i> expeditados
n_1	11
n_2	5
n_4	3
n_5	11
n_9	1
n_{10}	2
n_{14}	1
Total	34

Tabla 4.2: *Pallets* expeditados en el período 1. Primer ciclo.

El modelo compara los costos de transporte contra el costo por mantener el inventario en la fábrica, por lo que considera en el patrón de envío aquello que lo minimice. Existen ocasiones en las que resulta más económico enviar de manera adelantada algunos materiales y almacenarlos temporalmente en la fábrica hasta que sean llamados por la demanda, que embarcarlos de tal manera que lleguen justo en el período en el que son requeridos. En el escenario bajo evaluación, considerando las demandas mensuales por producto y la consolidación en embarques FCL, no fue necesario almacenar material.

Producto	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
n_1	0	2	1	21	7
n_2	3	8	5	8	16
n_3	8	0	2	7	3
n_4	0	0	0	0	2
n_5	7	7	0	3	7
n_6	0	5	5	0	5
n_7	1	1	0	1	0
n_8	4	2	0	0	0
n_9	0	1	0	0	0
n_{10}	1	1	0	0	0
n_{11}	1	1	1	0	0
n_{12}	2	2	2	1	1
n_{13}	1	2	2	0	4
n_{14}	12	8	4	14	1
n_{15}	0	0	1	0	2
n_{16}	0	0	0	2	0
Total de <i>pallets</i>	40	40	23	57	48
Total de contenedores	1	1	1	2	2
Utilización %	100	100	58	71	60

Tabla 4.3: Total de *pallets* consolidados en contenedores FCL para 6 períodos. Primer ciclo.

En la Tabla 4.3, se observa que los trayectos del puerto de origen (Hamburgo o Bremerhaven, según sea el caso) hacia Altamira, se realizan siempre en contenedores FCL. Esto indica que la consolidación en contenedores exclusivos para la empresa

es una opción más económica que enviar cargas LCL, como lo hace actualmente la organización. El tipo de contenedor seleccionado en todos los períodos es el 40 ST. A pesar de que el total de *pallets* embarcados por período no completan en todos los casos un contenedor, es decir, su porcentaje de utilización está por debajo del 100 %, se resalta el hecho de que no selecciona un equipo con menor capacidad. Por ejemplo, en el período 4, se utiliza un contenedor de 40 ST para mover 23 *pallets*. Otra opción que pudo haber sido parte del patrón de envío era usar un contenedor con menor capacidad (20 ST) y adicionalmente, manejar los 3 *pallets* restantes como cargas LCL. También, en los períodos 5 y 6 se prefiere enviar un contenedor completo de 40 ST y otro con la misma capacidad aunque sea subutilizado, que recurrir a un segundo contenedor de 20 ST.

El modelo alcanzó el valor óptimo en un tiempo de 300 segundos. Los costos totales de transporte para el primer ciclo del primer escenario son de \$80,919 USD.

4.2.2 CICLO 2

El patrón de envío del segundo ciclo se presenta en la Figura 4.2. Se refiere a la segunda parte del año, considerando desde el mes número 7 al mes número 12. Para fines del análisis, los períodos de este segundo ciclo se denominan del 1 al 6. El centro de consolidación y puerto de Hamburgo son seleccionados en los períodos 1 y 4. Los períodos 2 y 3 utilizan el centro y puerto de Bremerhaven. El período 6 no cuenta con demanda, por lo que en el período 5 no se embarca material y simplemente recibe los *pallets* embarcados del período previo.

El objetivo de contar con un segundo ciclo de 6 meses en el año para calcular nuevamente los patrones de envío radica en la oportunidad de ver reflejados los cambios en la demanda y reaccionar en los pedidos de material de una manera más cercana a la realidad. Para esta segunda fase el modelo podría correrse un período antes de concluir el ciclo 1. Siendo así, sería posible considerar los *pallets* enviados en

el último período del ciclo 1 como el inventario en tránsito que servirá para satisfacer la demanda del primer período del ciclo 2. El efecto que esto traería consigo es que se reducirían o tal vez se eliminarían las expeditaciones aéreas para el segundo ciclo. Sin embargo, para la experimentación del caso de estudio se consideró el peor escenario en el que el inventario en tránsito y el inventario inicial no existen y por lo tanto, las expeditaciones son necesarias. Por tal motivo, para satisfacer la demanda del período 1 o mes 7, se expeditan vía aérea algunos *pallets* debido a que por el tiempo tránsito puerto a puerto no alcanzarían a llegar en tiempo a la fábrica por vía marítima. En la Tabla 4.4, se muestra el total de *pallets* volados de cada producto. La demanda de cada producto en cada período determinará la cantidad de *pallets* a expeditar.

Producto	<i>Pallets</i> expeditados
n_1	13
n_2	4
n_4	1
n_5	2
n_6	8
n_7	1
n_9	2
n_{11}	1
n_{12}	2
n_{13}	2
n_{14}	17
n_{15}	1
Total	54

Tabla 4.4: *Pallets* expeditados en el período 1. Segundo ciclo.

En este ciclo tampoco es necesario almacenar en la fábrica *pallets* de períodos posteriores: lo que se ordena en un período determinado, es consumido en el período siguiente de llegada. Una vez más, en cada período es más económico consolidar la carga en contenedores completos de 40 ST, como se observa en la Figura 4.5. Es también evidente que los contenedores son subutilizados y que a pesar de esto, no se selecciona otro tipo de equipo con menor capacidad, como los contenedores de 20 ST o las cargas LCL. Por ejemplo, en el período 2 se utiliza un contenedor de 40 ST.

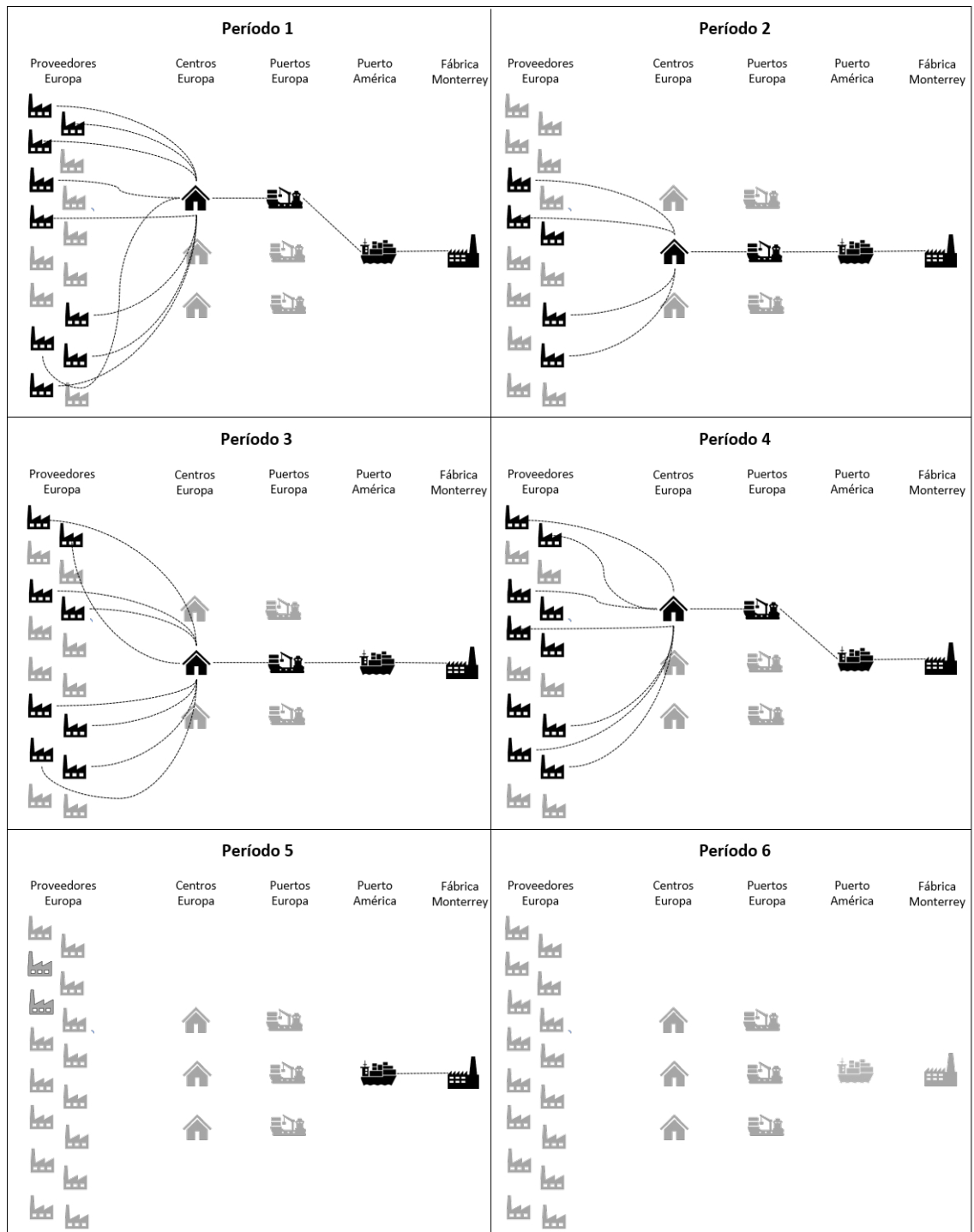


Figura 4.2: Patrón de envío con 6 periodos. Segundo ciclo.

Producto	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5
n_1	5	0	1	1
n_2	4	0	2	14
n_3	1	0	0	0
n_5	11	12	12	5
n_6	0	0	2	4
n_7	3	1	0	1
n_8	0	1	0	4
n_{11}	0	0	2	1
n_{12}	8	2	3	5
n_{13}	1	0	1	1
n_{14}	14	20	12	12
n_{15}	3	0	1	0
Total de <i>pallets</i>	50	36	35	48
Total de contenedores	2	1	1	2
Utilización %	63	90	88	60

Tabla 4.5: Total de *pallets* consolidados en contenedores FCL para 6 períodos. Segundo ciclo.

Los 10 *pallets* restantes se embarcan en otro contenedor de 40 ST y no en uno de menor capacidad, como el 20 FT o como *pallets* LCL. El motivo de tal selección en el patrón de envío es que es la opción que minimiza los costos totales de transporte aunque esto no implique una utilización del equipo al 100 %.

El modelo alcanzó el valor óptimo en un tiempo de 300 segundos. Los costos totales de transporte para el segundo ciclo del escenario 1 ascienden a \$89,033 USD.

4.2.3 COSTOS TOTALES

Los resultados del escenario 1 que incluyen dos ciclos de 6 meses cada uno se sintetizan en la Tabla 4.6. Ninguno de los ciclos requiere que se almacenen materiales de períodos posteriores. A pesar de que el total de contenedores enviados en el primer ciclo es mayor que en el segundo, sus costos totales son inferiores, ya que la cantidad de material expeditado es superior en el segundo ciclo. En el supuesto en el que el total de *pallets* enviados en el período 6 del ciclo 1 fueran considerados como el inventario en tránsito para el período 1 en el segundo ciclo, los costos totales se verían reducidos hasta en un 30 %. En el análisis realizado no se contempla dicho supuesto debido a que se buscaba obtener el peor escenario posible que implicara la expeditación del total de la demanda del período 1 en el ciclo 2.

El costo total de transporte del primer escenario englobando los 2 ciclos de planeación de 6 meses cada uno, y en los cuales el inventario en tránsito e inicial es cero, asciende a \$169,952 USD. Realizando la comparación de la estrategia propuesta utilizando centros de consolidación para reunir la carga de la empresa en contenedores exclusivos, se obtiene un ahorro del 8 %. Como puntos a favor se encuentran que de acuerdo a los datos utilizados de la demanda, no es necesario almacenar material. Otro punto a favor es que al partir el horizonte de planeación en dos bloques, es posible tomar en consideración los cambios en la demanda que se presenten al menos en la segunda parte del año.

Como punto en contra se encuentra el hecho de que los pedidos de material tienen una frecuencia mensual. Si bien, al correr en modelo para el ciclo 2 se consideran las fluctuaciones de la demanda, la cobertura mensual de las órdenes de compra no contribuye con un seguimiento tan cercano del comportamiento de la demanda.

Descripción	Ciclo 1	Ciclo 2	Total
<i>Pallets</i> aéreos	24	54	88
Contenedores	7	6	13
<i>Pallets</i> almacenados	0	0	0
Costo total USD	\$80,919	89,033	\$169,952 USD

Tabla 4.6: Integración del escenario 6+6.

4.3 SEGUNDO ESCENARIO

Este escenario contempla pedidos mensuales con una horizonte de planeación de 12 períodos o meses. El patrón de envío se observa en la Figura 4.3 y 4.4. En los períodos 2, 5, 6, 7 y 10 se utilizan el centro de consolidación y puerto de Hamburgo, mientras que para de los períodos 1, 3, 8 y 9 las ubicaciones seleccionadas se localizan en Bremerhaven. En el período 11 no se envía material debido a que no hay demanda en el período 12. En este último, tampoco hay embarques debido a que el ciclo termina justamente en él.

En la Tabla 4.7, se contempla el total de *pallets* expeditados vía aérea que contribuyen a complementar la demanda del primer período. Como el tiempo tránsito puerto a puerto es de un mes, aquellos productos con demanda en el período 1, ya que no cuentan con inventario en tránsito ni inventario inicial, se envían vía aérea para que puedan llegar a tiempo. Para la satisfacción de la demanda de los productos a partir del período 2, los envíos se realizan vía marítima.

Este escenario no requiere adelantar material para períodos posteriores, sino que se envía la cantidad exacta de *pallets* que satisfacen la demanda de cada producto

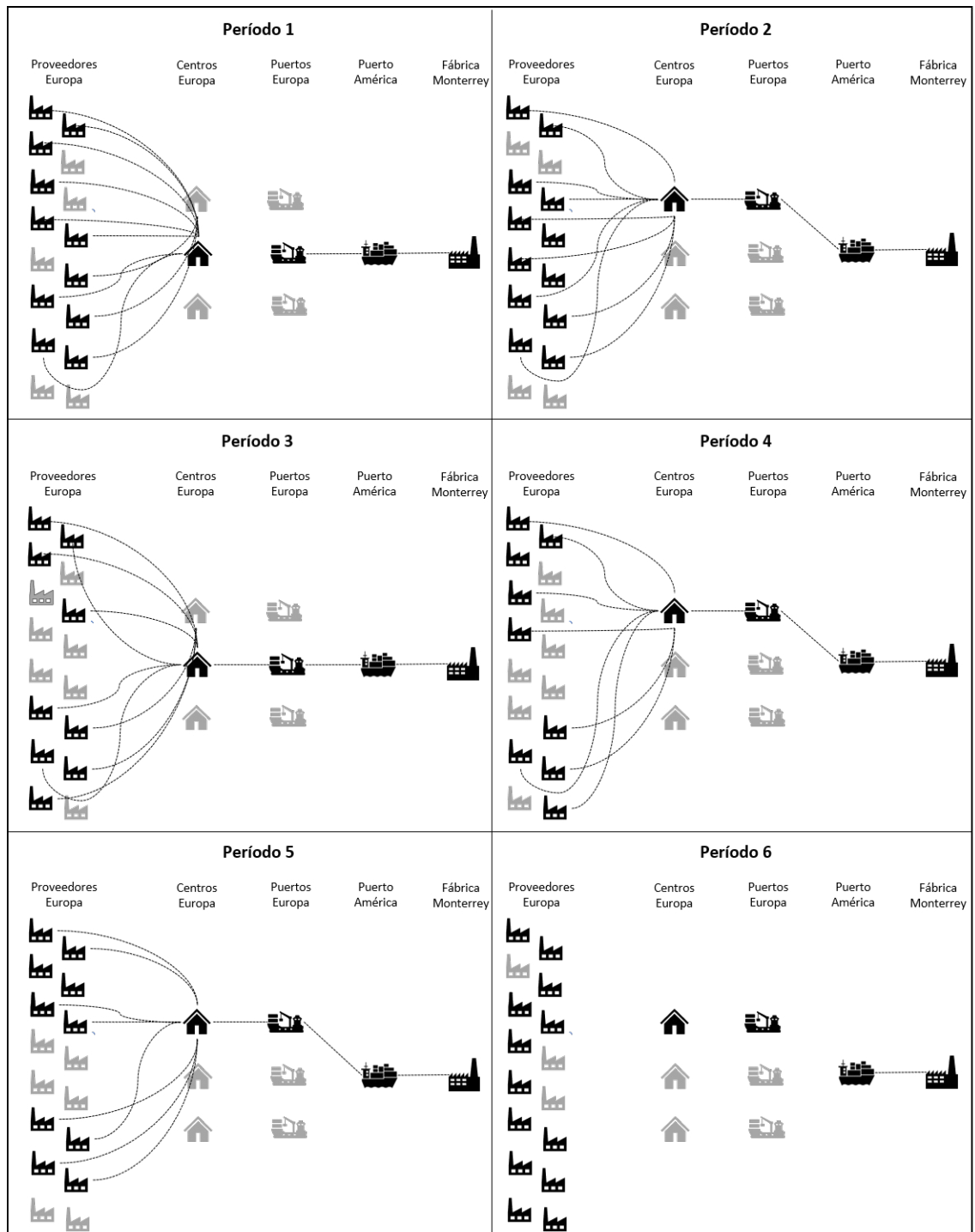


Figura 4.3: Patrón de envío con 12 períodos. Parte 1.

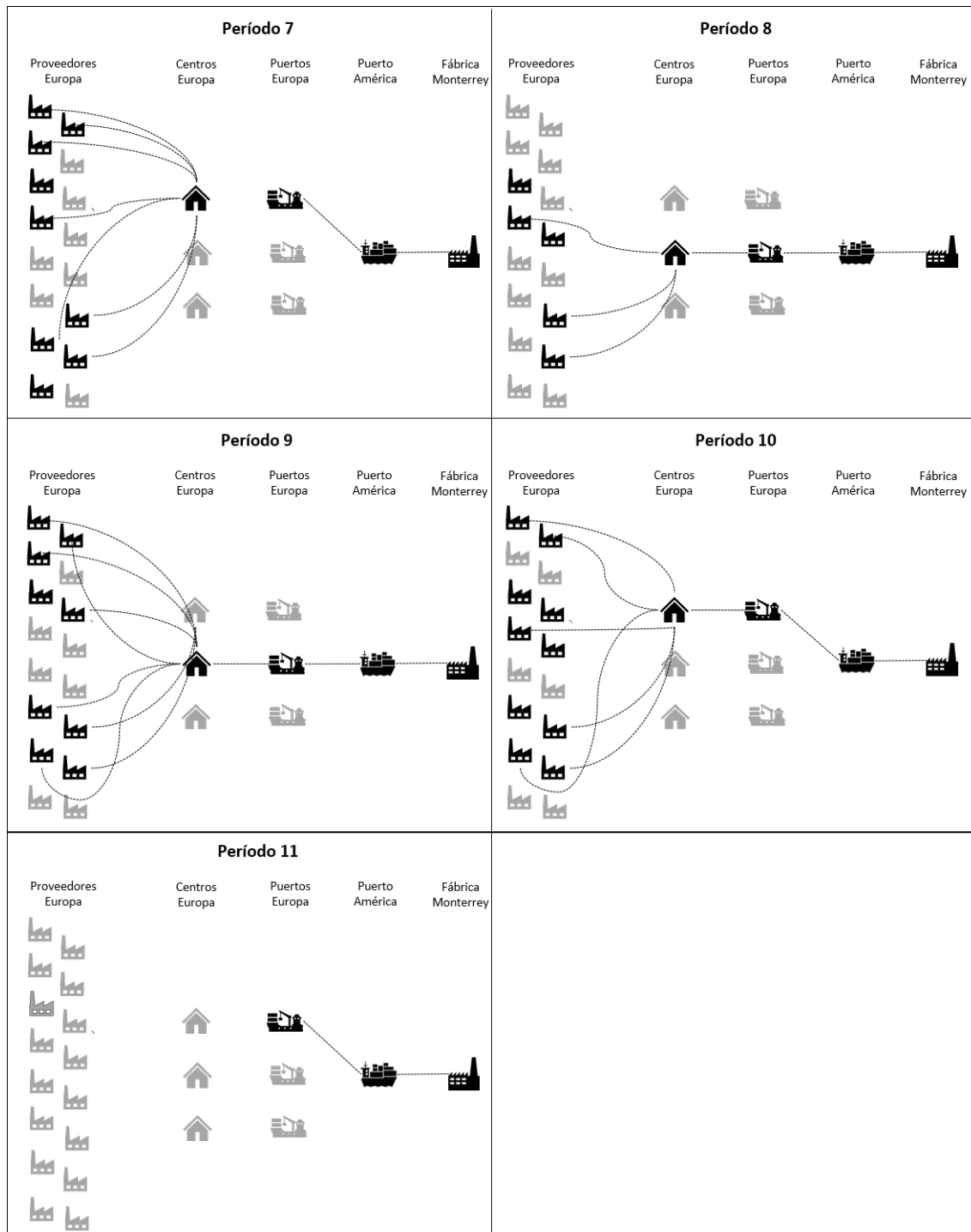


Figura 4.4: Patrón de envío con 12 períodos. Parte 2.

Producto	<i>Pallets</i> expeditados
n_1	11
n_2	5
n_4	3
n_5	11
n_9	1
n_{10}	2
n_{14}	11
Total	34

Tabla 4.7: *Pallets* expeditados en el período 1.

en cada período, sin obligarse a guardar material en el almacén. Este comportamiento es similar al observado en el escenario 1.

En la Tabla 4.8, se muestra que resulta más económico consolidar las cargas sueltas de los proveedores en contenedores completos exclusivos para la empresa, aún y cuando éstos no se encuentren al 100 % de utilización. Los contenedores 40 ST son elegidos sobre los 20 ST y sobre las cargas LCL. El motivo es que es más barato subutilizar un contenedor que elevar su porcentaje de utilización eligiendo uno de menor capacidad. Por ejemplo, en el período 4 se transportan 23 *pallets* en un contenedor 40 ST con un 58 % de utilización. Una combinación de embarque que pudo haber sido elegida por el modelo es consolidar la carga en un contenedor de 20 ST y adicionalmente crear un envío LCL de 3 *pallets*. Algo similar se observa en el período 11, en el que se envían 2 contenedores de 40 ST cada uno, en lugar de utilizar sólo un equipo de 40 ST y los 8 *pallets* sobrantes, enviarlos como embarque LCL.

El modelo alcanzó el valor óptimo en un tiempo de 3,600 segundos. Los costos totales de transporte para el segundo escenario ascienden a \$127,253 USD. Esta cifra representa un ahorro del 31 % respecto al gasto real que tuvo la empresa.

Producto	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7	Período 8	Período 9	Período 10	Período 11	Período 12
n_1	0	2	1	21	7	13	5	0	1	1	0
n_2	3	8	5	8	16	4	4	0	2	14	0
n_3	8	0	2	7	3	0	1	0	0	0	0
n_4	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0
n_5	7	7	0	3	7	2	11	12	12	5	0
n_6	0	3	5	0	5	8	0	0	2	4	0
n_7	1	1	0	1	0	1	3	1	0	1	0
n_8	4	2	0	0	0	0	0	1	0	4	0
n_9	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0
n_{10}	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n_{11}	1	1	1	0	1	1	0	0	2	1	0
n_{12}	2	2	2	1	4	2	8	2	3	5	0
n_{13}	1	2	2	0	1	2	1	0	1	1	0
n_{14}	12	8	4	14	2	17	14	20	12	12	0
n_{15}	0	0	1	0	0	1	3	0	0	0	0
n_{16}	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Total en <i>pallets</i>	40	38	23	57	48	54	50	36	35	48	0
Total en contenedores	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	0
Utilización %	100	95	58	71	60	68	63	90	88	60	0

Tabla 4.8: Total de *pallets* consolidados en embarques FCL para 12 períodos.

4.4 TERCER ESCENARIO

Para este escenario se consideró una distribución de la demanda en 52 períodos. A diferencia de los escenarios 1 y 2, los pedidos se realizan de manera semanal. De esta manera, se pretende solicitar el material requerido para cada período, considerando el tiempo tránsito de los puertos de origen hacia el puerto destino y así, lograr una mayor flexibilidad respecto a los cambios de la demanda.

Dada la definición de sus períodos semanales, el tiempo que transcurre desde el puerto de origen en Europa al puerto destino en Altamira es de 4 períodos: lo que se envíe en un período determinado, llegará al puerto destino 4 períodos o 4 semanas después. Debido a esto, bajo el supuesto de no contar con inventario inicial ni inventario en tránsito, se requieren expeditar los *pallets* que satisfagan la demanda de los primeros 4 períodos. En la Tabla 4.9, se muestra el total de material volado en términos de *pallets*. El total de expeditaciones asciende a 34 *pallets*.

Producto	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
n_1	2	0	9	0
n_4	0	5	0	0
n_5	0	1	0	0
n_6	0	1	1	0
n_8	0	6	0	5
n_{10}	3	0	0	0
n_{16}	1	0	0	0
Total	6	13	10	5

Tabla 4.9: *Pallets* expeditados en los períodos 1 al 4.

La apertura de los centros de consolidación y puertos se representa en la Tabla 4.10. Puesto que los centros de consolidación potenciales se ubican de manera contigua a cada puerto de la misma ciudad, una vez seleccionado un centro de consolidación, el puerto de la misma ciudad formará parte del patrón de envío al ser la opción más económica gracias a que la distancia entre ellos es la menor.

Instalación (centro de consolidación y puerto)	Período
Hamburgo	17, 22, 24, 43
Bremerhaven	2, 5, 7, 11, 15, 19, 26, 28, 31, 34, 36, 41

Tabla 4.10: Activación de instalaciones por período.

En la Tabla 4.11, se muestran los envíos y llegadas de los *pallets* por período. La semana 1 no aparece en el renglón de período de envío a causa de que no existe demanda en el período 5. Los envíos marítimos comienzan a partir del período 2, los cuales, son recibidos en destino a partir del período 6, 1 mes después de ser embarcados. La consolidación de carga en contenedores completos FCL de 40 ST exclusivos para la empresa es la opción que minimiza los costos totales de transporte aunque el equipo no se utilice en su totalidad. Por ejemplo, en el período 31, se embarcan 14 *pallets*, subutilizando el contenedor un 65 %. Esto es más barato que seleccionar un contenedor de 20 ST, con el cual la subutilización sería de 30 %.

Es importante notar que no en todos los períodos se embarca material. Existen dos razones potenciales:

1. Cinco períodos posteriores a la fecha en la que se pretende realizar el pedido no existe una demanda por cubrir.
2. La demanda fue cubierta con anticipación por un pedido previo y el material se encuentra almacenado en la fábrica, esperando el llamado de la demanda.

Los productos que se envían de manera anticipada y se almacenan algunos períodos en la fábrica, se presentan en la Tabla 4.12. La capacidad de almacenamiento de la planta influye de manera profunda en la determinación del patrón de envío. Por ejemplo, del producto n_{16} se envían 11 *pallets* en el período 36. La demanda de este producto en el período 40 de su llegada, es de 3 *pallets*, por lo que se almacenan los 8 sobrantes. En el mismo período, se inventarían 3 *pallets* del producto n_{14} , 6 *pallets* del n_8 , 2 del n_7 y 1 del n_1 . En total, se cuenta con 20 *pallets* inventariados durante el período 40. Dado que el producto n_{16} tiene demanda de 5 *pallets* en el

Período de envío	2	5	7	11	15	17	19	23	24	26	28	31	34	36	41	43
Período de recepción	6	9	11	15	19	21	23	27	28	30	32	35	38	40	45	47
n_1	-	2	-	1	8	13	7	-	13	-	5	-	-	1	1	-
n_2	1	1	-	1	-	-	-	-	1	1	1	1	1	-	-	1
n_3	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
n_4	3	4	4	5	3	5	16	-	2	2	-	4	-	-	-	4
n_5	-	-	1	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
n_6	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-
n_7	-	5	-	5	-	-	-	5	-	-	-	-	-	2	14	-
n_8	7	2	5	-	3	-	4	11	2	5	-	-	12	2	1	4
n_9	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	2	1	-	12	-	4
n_{10}	-	-	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-	-	-	-	-
n_{11}	1	-	1	1	-	-	1	-	-	1	-	-	-	2	1	-
n_{12}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
n_{13}	8	-	-	2	5	2	3	-	-	-	1	-	-	-	-	-
n_{14}	2	-	2	2	1	2	-	4	1	6	2	1	2	3	1	4
n_{15}	1	5	2	2	-	-	1	-	-	2	1	-	-	1	1	-
n_{16}	12	-	3	7	9	2	2	6	1	16	8	7	13	11	8	4
Total en <i>pallets</i>	40	22	18	27	29	24	34	29	23	33	26	14	29	34	27	21
Total contenedores	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Utilización %	100	55	45	68	73	60	85	73	58	83	65	35	73	85	68	53

Tabla 4.11: Total de *pallets* consolidados en embarques FCL para 52 períodos.

período 42, la diferencia de 3 *pallets* se almacena durante este mismo período. En el período 43, el producto n_{16} cuenta con una demanda de 4 *pallets*. Al no contar con suficiente inventario, es necesario expeditar el *pallet* faltante. Si se contara con una mayor disponibilidad de ubicaciones en almacén de la fábrica, hubiera sido posible embarcar vía marítima los 12 *pallets* del producto n_{16} en el período 36 y se hubiera completado la demanda del período 43 sin necesidad de expeditar material. En este ejemplo, se observa que las expeditaciones aéreas se desarrollan como la opción de rescate cuando el inventario en tránsito, el inventario *on hand* o las consolidaciones marítimas no logran solventar completamente un requerimiento de material.

El número de períodos que permanecen los *pallets* inventariados también puede observarse en la Tabla 4.12. En color verde, se muestran los materiales que permanecieron un sólo período, ya que al siguiente fueron consumidos. En color rosa y azul, se observan los *pallets* que permanecieron dos períodos. Finalmente, en color naranja se presentan los materiales que permanecieron almacenados 3 períodos. Esto significa que, dada la capacidad del almacén de la fábrica y los costos por mantener inventario, se adelantaron embarques hasta 3 semanas previas al uso del material. En la Figura 4.5, se muestra la cantidad de embarques que permanecieron almacenados de 1 a 3 períodos. De un total de 66 eventos, el 79 % permanecieron 1 período, 14 % estuvieron 2 períodos y el 7 % se almacenaron 3 períodos. En términos de cantidad de *pallets*, 180 se consumieron el período posterior a su llegada, 12 *pallets* se consumieron 2 períodos posteriores a su llegada y alrededor de 17 *pallets* esperaron 3 períodos en el almacén hasta ser consumidos.

Como consecuencia del incremento en la complejidad del problema al manejar un conjunto de 52 períodos, el tiempo de ejecución se elevó hasta 18,000 segundos. Para este escenario se aceptó una brecha del 3 % respecto al valor óptimo, con la cual, los costos totales de transporte suman un total de \$134,499 USD. Dicha cifra representa un ahorro del 27 % respecto al caso real de la empresa.

Producto/ Período	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8	n_9	n_{10}	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{14}	n_{15}	n_{16}	Total
6	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	1	-	5	-	-	2	15
9	-	1	-	1	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	4
11	-	-	-	2	1	-	-	2	-	-	1	-	-	1	2	1	10
12	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	4
15	1	1	-	2	-	-	5	-	-	-	-	-	-	1	2	3	15
16	1	1	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	3	8
17	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	4
19	8	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	1	-	-	12
21	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12
23	7	-	-	6	-	-	-	2	-	-	1	-	-	-	1	1	18
24	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	1	-	-	-	-	1	4
26	-	-	-	-	1	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	6	15
28	-	1	-	2	1	-	-	-	1	1	-	-	-	1	-	-	7
30	-	1	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	5	-	6	17
32	-	-	-	-	-	-	-	6	1	-	-	-	-	1	1	8	17
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	7
38	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	9	15
40	1	-	-	-	-	-	2	6	-	-	-	-	-	3	-	8	20
41	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	1	-	8	11
42	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	1	-	3	6
45	-	-	-	6	-	-	-	1	-	-	1	-	-	1	-	3	12
47	-	1	2	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	2	-	4	13

Tabla 4.12: Total de *pallets* a inventariar en 52 períodos.

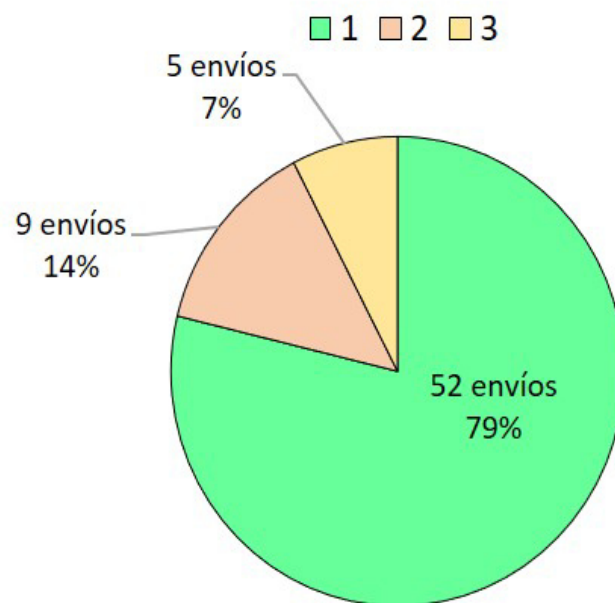


Figura 4.5: Distribución en porcentaje de los períodos de permanencia de los envíos.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se comparan y analizan los resultados obtenidos de los tres escenarios desarrollados respecto al gasto real del 2017 de la empresa del caso de estudio. Además, se hace la recomendación final del escenario que de manera holística beneficia a la organización.

5.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los costos logísticos reales en los que incurrió la empresa protagonista del caso de estudio asciende a los \$183,742 USD. Se transportaron un total de 465 *pallets* LCL. Cabe recordar que su red de abastecimiento no contempla el uso de centros de consolidación que reúnan la carga de sus proveedores en contenedores FCL exclusivos para ellos.

Los resultados obtenidos de cada escenario se comparan en la Tabla 5.1. Un punto clave a evaluar es la frecuencia y la cobertura de los pedidos. La organización cuenta actualmente con un enfoque de puntual seguimiento de la demanda, en el que se pretende reaccionar lo más rápido posible ante cualquier movimiento hacia arriba o hacia abajo. La actividad es de por sí compleja considerando los tiempos tránsito transcontinentales, sin embargo, dentro de un ambiente de incertidumbre, se

Descripción	Frecuencia de pedidos	Brecha al óptimo (%)	Costo total (USD)	Ahorro (%)	Pallets expeditados	Contenedores exclusivos	Pallets almacenados
Escenario 1 (6+6)	Mensual	0	\$169,952	8	88	13	0
Escenario 2 (12 períodos)	Mensual	0	\$127,253	31	34	15	0
Escenario 3 (52 períodos)	Semanal	3	\$134,499	27	35	16	246

Tabla 5.1: Síntesis de resultados de los escenarios.

debe procurar un balance entre los costos logísticos de transporte y los costos por mantener inventario, cuidando de no comprometer la disponibilidad del material. Entre mayor cobertura se maneje en los pedidos, mayor será el riesgo de responder de manera inapropiada ante un cambio brusco que genere escasez o exceso de inventario.

En el primer y segundo escenario se consideran períodos mensuales, en los que los pedidos se realizan con esa misma frecuencia. La diferencia entre ellos radica en que el escenario 6+6, contempla la planeación de 6 meses y posteriormente, suma los siguientes 6 meses, lo cual, permite visualizar los cambios de la demanda de la segunda parte del año, mientras que el escenario 2 toma en cuenta el horizonte completo en un solo momento.

El escenario 3, por su parte, cuenta con períodos semanales. La ventaja de esto es que le permite tener una mayor flexibilidad que la que podría existir en los escenarios anteriores, ya que la demanda es «seguida» semana a semana.

Tanto para los escenarios 1 y 2, no es necesario recurrir al almacenamiento en la fábrica porque la cantidad de *pallets* enviados por período iguala la demanda de un período posterior.

Para el escenario 3, se muestra en la Tabla 5.1 la cantidad total de *pallets* que se almacenaron durante el ciclo. Un hallazgo importante es que gracias a las localidades de almacenamiento disponibles en la fábrica, la herramienta encontró el patrón de envío que minimiza los costos globales de transporte y almacenamiento, consolidando material con demanda en su período de llegada e incluso, de períodos posteriores a ella. Esto genera como consecuencia, que haya semanas en las que no es necesario ordenar material: la carga ya fue solicitada períodos previos y al llegar a su destino, es almacenada hasta su consumo pronosticado. Un riesgo detectado bajo este escenario de adelantos en la demanda, es que si se generara un cambio súbito en la misma, ya no podría ser considerado, porque el material ya habría sido embarcado. Sin embargo, según lo observado en la Figura 4.5, para el caso de estudio esta condición no debería tener gran impacto, ya que de 66 embarques realizados

que debieron almacenarse, sólo el 7 % se envió con 3 períodos anticipación.

Respecto a las expeditaciones, bajo el supuesto de que no contar con inventario en tránsito ni inicial en el período cero, el escenario con mayor cantidad de material expeditado vía aérea es el primero. Se asume que todo el inventario del primer ciclo fue consumido y no existe material en tránsito. Por tal motivo, en el segundo ciclo es necesario volver a expeditar material.

Los escenarios 2 y 3 presetan prácticamente la misma cantidad de expeditaciones. Tiene sentido debido a que su cobertura de la demanda es la misma: el escenario 2 cubre un período o un mes, mientras que el escenario 3 cubre 4 períodos, es decir, 4 semanas.

En los tres escenarios analizados, se comprueba que la opción más económica es consolidar la carga en embarques FCL, aún y cuando el porcentaje de utilización de los contenedores esté por debajo del 100 %. El tipo de equipo seleccionado fue siempre el denominado como 40 ST. En ninguno de los experimentos la herramienta sugirió el embarque de cargas sueltas LCL o el uso de contenedores de menor capacidad, como los son los contenedores 20 ST.

Tomando en cuenta las brechas con respecto al óptimo, los escenarios 1 y 2 alcanzaron la optimalidad, con un 0 % de brecha, mientras que el escenario 3 está a un 3 % del valor óptimo. La diferencia consiste en la cardinalidad del conjunto de períodos de tiempo: mientras que el escenario 1 se corre cada ciclo con un conjunto de 6 períodos y en el escenario 2 considera un conjunto de 12 períodos, el escenario 3 analiza 52 períodos. Incluso si el tercer escenario alcanzara la optimalidad, permanecería en la segunda posición en cuanto a la minimización de costos totales de transporte de los 3 escenarios.

Con la evaluación correspondiente de los costos totales de transporte y almacenamiento, el escenario 2 resulta ser la opción más económica, seguida por el 3 y finalmente, el 1. Los porcentajes de ahorro con respecto al gasto real van desde un 8 % en el escenario número 1, pasando por un 31 % del escenario 2 y un 27 % en el

escenario 3.

5.2 RECOMENDACIÓN FINAL

Los 3 escenarios analizados aceptan la hipótesis propuesta y se comprueba que la consolidación de embarques en contenedores exclusivos para la empresa y el patrón de envío sugeridos por la herramienta de optimización minimizan los costos totales de transporte.

Debido al gran empuje que tiene la empresa hacia la iniciativa de seguimiento de la demanda por medio de su corte o incremento de una manera eficiente, el escenario recomendado a ser aplicado al presente caso de estudio es el número 2. Consolidando la carga en embarques exclusivos FCL y siguiendo el patrón de envío recomendado por la herramienta, se estima que el ahorro respecto al gasto real es del 27 %. A pesar de no ser la opción que genera el mayor ahorro económico, su estructura contiene una estrategia que apoya a la gestión de inventarios por medio de la colocación de pedidos semanales, que le brindan una gran flexibilidad de adaptación a los cambios y la dota de un gran potencial para inyectar eficiencia a la cadena de suministro, dados los beneficios operativos que trae consigo el manejo de contenedores FCL con respecto a las cargas LCL que se manejan actualmente.

Otra ventaja que brinda la propuesta es que la medida no requiere la edificación de centros de consolidación por parte de la organización, sino que se sugiere el uso de servicios de consolidación ofrecidos por las empresas de logística. Esto permite adicionalmente que constantemente se evalúe cuál es la ruta más económica y que se realice el cambio inmediato o incluso, que la dinámica permita una alternancia de acuerdo al volumen de la demanda.

Si bien, dentro de las opciones exploradas este escenario es el que mejor se adapta a las necesidades del negocio, puede ser perfeccionado posteriormente. Debido a la capacidad de almacenamiento disponible de la fábrica, la herramienta sugiere en

algunas períodos el adelanto de embarques, ampliando la cobertura del pedido en más de una semana. Para alinear esta situación, se recomienda reducir en la herramienta la capacidad de almacenamiento de la fábrica, para inducir a la creación de un patrón que contenga una cobertura de la demanda de la semana que le corresponde y la siguiente, como máximo. Dentro de las instancias que se realizaron para verificar los resultados, se comprobó que reduciendo un 50 % en la herramienta la capacidad de almacenamiento por período de la fábrica, con un brecha del 3.89 % con respecto al óptimo, el resultado era satisfactorio y el ahorro potencial era de un 21 %. El tiempo de ejecución bajo estas condiciones es superior (arriba de 54,000 segundos), por lo que se sugiere que la mejora se considere como desarrollo de trabajo a futuro.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

El capítulo final se encuentra organizado en tres secciones. En la primera, se relatan las aportaciones a la cadena de suministro que la investigación presentada ha generado. En seguida, se menciona la contribución científica realizada, finalizando con las sugerencias de trabajo a futuro.

6.1 APORTACIONES A LA CADENA DE SUMINISTRO

El objetivo de la resolución del problema de localización de instalaciones presentado en el caso de estudio, persigue la minimización de los costos de transporte reduciendo el impacto en otras áreas de la empresa. Por esta razón, la opción recomendada para dar solución al problema no es la que representa el mayor ahorro económico, sino aquella con mayor afinidad con respecto a los objetivos estratégicos de la organización. A través de los experimentos realizados para analizar el comportamiento de los patrones de envío y de la selección de los centros de consolidación, fue perceptible cómo soluciones matemáticamente correctas no formaban parte de opciones viables para la operación real. Gracias a estos descubrimientos fue posible ir realizando los ajustes que se consideraron necesarios hasta que las instancias arrojaran resultados lógicos no solamente dentro del lenguaje de programación lineal, sino para su factible implementación en la cadena de suministro.

La principal aportación a la cadena de suministro es que se brinda no solo a la empresa del caso de estudio, sino a cualquier organización que se encuentre en una situación similar, una herramienta que, alimentada de manera adecuada, es capaz de calcular todas las opciones posibles y arrojar como resultado el patrón de envío óptimo. Tiene la gran ventaja de ser una herramienta flexible y susceptible a ser adaptada a la necesidad del momento. Adicionalmente, cuenta con la virtud de brindar una visualización panorámica de la cadena de suministro, entrelazando a los proveedores de materia prima, las empresas de servicios logísticos, las agencias aduanales, entre otros, sin olvidar mencionar las áreas internas de la fábrica que también están involucradas, como el equipo de importaciones, materiales, recibos y almacén, por mencionar algunos.

La capacidad de tomar decisiones de manera acertada y anticipada, es una característica particular de las empresas altamente competitivas. Con el apoyo de herramientas como la sugerida, es posible analizar y vislumbrar en un largo plazo, los cambios que la misma demanda va dictando, apoyando la toma de decisiones estratégicas que engloban a todos los participantes de la cadena de suministro y no solamente a un segmento de la misma.

Respecto a la operación del día a día, el principal impacto se traduce en la reducción de entre 2 y 3 días de tiempo tránsito de Altamira hacia la fábrica debido a que se podrá evitar el proceso de desconsolidación de carga en el puerto destino. También contribuye a la reducción del volumen de operaciones de importación, ya que la consolidación en FCL provoca que el proceso de despacho aduanal se ejecute sobre contenedores completos para la misma empresa, en lugar de realizar el proceso de importación para cada carga de cada proveedor de manera independiente y aislada.

Por parte de la gestión de inventarios, el impacto positivo se refleja en el robustecimiento de la política de inventarios por medio de la ejecución de pedidos semanales que buscan el balance entre la cantidad de material que se requiere pa-

ra satisfacer la demanda, los costos por mantener dicho inventario y los espacios disponibles en almacén.

El trabajo expuesto se basa en un herramienta viva que debe actualizarse continuamente mediante un flujo de mejora continua que certifique que el diseño de la cadena de suministro de la empresa es el adecuado dadas sus características y objetivos estratégicos. El método científico reta la dinámica tradicional empresarial y la confronta con una realidad en movimiento, sugiriendo el análisis de diversas alternativas y buscando incrementar el nivel de competitividad.

6.2 CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA

El modelo presentado para solucionar el problema de localización de instalaciones del caso de estudio es una generalización del trabajo desarrollado por Morales (2016). La contribución adicional consiste en haber incluido en el modelo la restricción que impide dividir la demanda de un mismo producto en un mismo período desde los centros de consolidación hacia los puertos, debido a la complejidad operativa y documental que esto representa. Adicionalmente, el modelo propuesto considera la capacidad de almacenamiento de la fábrica para generar el mejor patrón de envío. Es una aportación interesante por las implicaciones que esto conlleva: crea el balance adecuado entre los costos de transporte y de almacenamiento, satisfaciendo la demanda en tiempo y forma, procurando mantener la salud de los inventarios y las utilizaciones de almacén bajo control.

6.3 TRABAJO A FUTURO

Durante la fase de experimentación se observó que al manejar el conjunto de períodos con una cardinalidad de 6 y 12, el tiempo de respuesta es de 300 y 3,600 segundos, respectivamente. Sin embargo, para garantizar un mejor seguimiento de

la demanda, se requiere que el conjunto cuente con 52 períodos, lo cual, dificulta su procesamiento. El tiempo de ejecución de esta opción es de 18,000 segundos. La complejidad se incrementa aún más si se reduce la capacidad de almacenamiento de la fábrica. Por lo tanto, se recomienda desarrollar el planteamiento de algún método aproximado, por ejemplo, una heurística que permita mejorar los tiempos de respuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- ARMAS, J., A. A. JUAN, J. M. MARQUÈS y J. P. PEDROSO (2017), «Solving the deterministic and stochastic uncapacitated facility location problem: from a heuristic to a simheuristic», *Journal of the Operational Research Society*, **68**(10), págs. 1161–1176, URL <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0155-6>.
- ATTA, S., P. R. S. MAHAPATRA y A. MUKHOPADHYAY (2018), «Deterministic and Randomized Heuristic Algorithms for Uncapacitated Facility Location Problem», en S. C. Satapathy, J. M. R. Tavares, V. Bhateja y J. R. Mohanty (editores), *Information and Decision Sciences*, Springer Singapore, Singapore, págs. 205–216.
- BALLOU, R. H. (2004), *Logística Administración de la cadena de suministro*, capítulo Estrategia de ubicación, Pearson Prentice Hall, México.
- BELTRAN-ROYO, C., J.-P. VIAL y A. ALONSO-AYUSO (2010), «Semi-Lagrangian relaxation applied to the uncapacitated facility location problem», *Computational Optimization and Applications*, **51**(1), págs. 387–409, URL <https://doi.org/10.1007%2Fs10589-010-9338-2>.
- BILDE, O. y J. KRARUP (1977), «Sharp Lower Bounds and Efficient Algorithms for the Simple Plant Location Problem», en P. Hammer, E. Johnson, B. Korte y G. Nemhauser (editores), *Studies in Integer Programming, Annals of Discrete Mathematics*, tomo 1, Elsevier, págs. 79 – 97, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167506008707283>.

- BOYACI, T. y G. GALLEGRO (2002), «Coordinating pricing and inventory replenishment policies for one wholesaler and one or more geographically dispersed retailers», *International Journal of Production Economics*, **77**(2), págs. 95 – 111, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527301002298>.
- CASAS-RAMÍREZ, M.-S., J.-F. CAMACHO-VALLEJO y I.-A. MARTÍNEZ-SALAZAR (2018), «Approximating solutions to a bilevel capacitated facility location problem with customer's patronization toward a list of preferences», *Applied Mathematics and Computation*, **319**(Supplement C), págs. 369 – 386, recent Advances in Computing, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300317302357>.
- ÇETINKAYA, S. (2005), *Coordination of Inventory and Shipment Consolidation Decisions: A Review of Premises, Models, and Justification*, Springer US, Boston, MA, págs. 3–51, URL https://doi.org/10.1007/0-387-23392-X_1.
- CHOPRA, S. y P. MEINDL (2001), *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*, primera edición, Prentice Hall, US.
- CHRISTALLER, W. (1933), *Los lugares centrales en Alemania meridional*, primera edición, Prentice Hall, Alemania.
- CRAINIC, T. G. (2003), *Long-Haul Freight Transportation*, Springer US, Boston, MA, págs. 451–516, URL https://doi.org/10.1007/0-306-48058-1_13.
- CSCMP (2013), «Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) Definitions and Glossary», <https://cscmp.org/>, accedido 05-05-2017.
- CURRENT, J., S. RATICK y C. REVELLE (1998), «Dynamic facility location when the total number of facilities is uncertain: A decision analysis approach», *European Journal of Operational Research*, **110**(3), págs. 597 – 609, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221797003032>.
- DANTZIG, G. B. (1963), *Linear programming and extensions*, primera edición, Princeton University Press, N.J. United States.

- DASKIN, L. V. SNYDER y R. T. BERGER (2005), *Facility Location in Supply Chain Design*, segunda edición, Springer, Boston, MA.
- DE BOER, P.-T., D. P. KROESE, S. MANNOR y R. Y. RUBINSTEIN (2005), «A Tutorial on the Cross-Entropy Method», *Annals of Operations Research*, **134**(1), págs. 19–67, URL <https://doi.org/10.1007/s10479-005-5724-z>.
- DREZNER, Z. y H. W. HAMACHER (2002), *Facility location. Applications and theory*, capítulo Discrete network location models, Springer-Verlag, Alemania.
- ERLENKOTTER, D. (1978), «A Dual-Based Procedure for Uncapacitated Facility Location», *Operations Research*, **26**(6), págs. 992–1009, URL <https://EconPapers.repec.org/RePEc:inm:oropre:v:26:y:1978:i:6:p:992-1009>.
- FAZAYELI, S., A. EYDI y I. N. KAMALABADI (2018), «A model for distribution centers location-routing problem on a multimodal transportation network with a meta-heuristic solving approach», *Journal of Industrial Engineering International*, **14**(2), págs. 327–342, URL <https://doi.org/10.1007/s40092-017-0218-6>.
- FONTALVO, M. O., V. C. MAZA y P. MIRANDA (2017), «A Meta-Heuristic Approach to a Strategic Mixed Inventory-Location Model: Formulation and Application», *Transportation Research Procedia*, **25**(Supplement C), págs. 729 – 746, world Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. 10-15 July 2016, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517307615>.
- GEOFFRION, A. y G. GRAVES (1974), «Multicommodity distribution system design by benders descomposition», *Management Science*, **20**(5), págs. 822–844.
- GHOSH, D. (2003), «Neighborhood search heuristics for the uncapacitated facility location problem», *European Journal of Operational Research*, **150**(1), págs. 150 – 162, o.R. Applied to Health Services, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221702005040>.
- HEKMATFAR, M. y R. FARAHANI (2009), *Facility location: concepts, models, algorithms and case studies*, primera edición, Physica-Verlag, Heidelberg, Germany.

- HILLIER, F. y G. LIEBERMAN (2010), *Introduccion a la investigacion de operaciones [recurso electrónico]*, McGraw-Hill Interamericana, S.A., URL <https://books.google.com.mx/books?id=V1hjswEACAAJ>.
- HOLLAND, J. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, primera edición, The MIT Press, United States.
- KAYA, O. y B. UREK (2016), «A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply chain», *Computers and Operations Research*, **65**, págs. 93 – 103, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054815001720>.
- KECHMANE, L., B. NSIRI y A. BAALAL (2018), «A hybrid particle swarm optimization algorithm for the capacitated location routing problem», *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, **11**(1), págs. 106–120, <https://doi.org/10.1108/IJICC-03-2017-0023>, URL <https://doi.org/10.1108/IJICC-03-2017-0023>.
- KLOSE, A. y A. DREXL (2003), «Facility location models for distribution system design», *European Journal for Operational Research*, **162**(1), págs. 4–29.
- MARÍĆ, M. (2016), «Metaheuristic approaches to solving large-scale bilevel uncapacitated facility location problem with clients' preferences», *Yugoslav Journal of Operations Research*, **25**(3), págs. 361–378.
- MARTIN, R. K. (1999), *Large scale linear and integer optimization: a unified approach*, capítulo Linear and integer linear optimization, Kluwer Academic Publishers, United States.
- MCCALL, J. (2005), «Genetic algorithms for modelling and optimisation», *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **184**(1), págs. 205 – 222, special Issue on Mathematics Applied to Immunology, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377042705000774>.

- MORALES, C. M. C. (2016), *Optimización de costos logísticos en productos importados desde Asia*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- PARKER, M. (2007), «Compendio para la clase de Geografía económica de la Universidad Iberoamericana Torreón», recurso libre.
- PERSSON, F., D. ERLANDSSON, A. LARSSON y M. JOHANSSON (2013), «Solving location problems with simulation modelling — A case from the construction industry», *2013 Winter Simulations Conference (WSC)*, págs. 3363–3374.
- RAE (2017), «Diccionario de la Real Academia Española», <http://dle.rae.es/?id=R7YxPPp>.
- SÖRENSEN, K., M. SEVAUX y F. GLOVER (2018), *A History of Metaheuristics*, Springer International Publishing, Cham, págs. 1–18, URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-07153-4_4-1.
- STIGLER, G. J. (1945), «The cost of subsistence», *Journal of Farm Economics*, **27**(1), págs. 303–314.
- SULE, S. D. (2001), *Logistics facility location and allocation*, capítulo Introduction and qualitative methods, Marcel Dekker, Inc., Ruston, Louisiana.
- THÜNEN, J. y F. PERTHES (1826), *El estado aislado*, primera edición, Palgrave Macmillan, Alemania.
- THÜNEN, J. V. y L. ROSTOCK (1842), *El estado aislado*, segunda edición, Palgrave Macmillan, Alemania.
- WEBER, A. (1929), *Theory of the location of industries*, primera edición, The University of Chicago Press, Chicago, IL.
- YANG, X. (2011), «Metaheuristic Optimization», *Scholarpedia*, **6**(8), pág. 11472, revision #91488.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Daniela Román Echevarría

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

MINIMIZACIÓN DE COSTOS DE TRANSPORTE EUROPA-MONTERREY

Nacida en Gómez Palacio, Durango, el 19 de noviembre de 1988. Mis papás, José Natividad Román Olvera y María Isabel Echevarría Batres, son igualmente laguneros. Graduada de la Universidad Iberoamericana Torreón de la Licenciatura en Comercio Exterior y Aduanas. Laboré en Integration Point en Torreón, Coahuila, como practicante y luego como colaboradora de tiempo completo. Posteriormente me mudé a Monterrey, Nuevo León, para integrarme a la empresa del caso de estudio que presento, donde trabajé como especialista de exportaciones por 5 años. Actualmente me desempeño como planeadora de materiales en la misma organización.